BRIAN GREENE

author of *The Elegant Universe*

Hasta el final del tiempo

Mente, materia y nuestra búsqueda de significado en un universo en evolución

Índice

TAMBIÉN POR BRIAN GREENE

La realidad oculta

El tejido del cosmos

El Universo Elegante

ESTE ES UN LIBRO DE BORZOI PUBLICADO POR ALFRED A. KNOPF

 Publicado en los Estados Unidos por Alfred A. Knopf, una división de Penguin Random House LLC, Nueva York, y distribuido en Canadá por Penguin Random House Canada Limited, Toronto.

www.aaknopf.com

Knopf, Borzoi Books y el colofón son marcas registradas de Penguin Random House LLC.

Datos de catalogación en publicación de la Biblioteca del Congreso

Nombres: Greene, B. (Brian), [fecha] autor.

Título: Hasta el final de los tiempos: la mente, la materia y nuestra búsqueda de sentido en un universo en evolución / Brian Greene.

Descripción: Primera edición. | Nueva York: Libros Alfred A. Knopf, 2020. | Incluye referencias bibliográficas e índice.

Identificadores: LCCN 2019022442 (impresión) | LCCN 2019022443 (ebook) | ISBN 9781524731670 (tapa dura) | ISBN 9781524731687 (ebook)

Sujetos: LCSH: Cosmología. | Física-Filosofía.

Clasificación: LCC QB981 .G7434 2020 (impresión) | LCC QB981 (ebook) | DDC 523.1-dc23

El registro de la LC está disponible en https://lccn.loc.gov/2019022442

El registro del libro electrónico de la LC está disponible en https://lccn.loc.gov/2019022443

Ebook ISBN 9781524731687

Fotografía de la portada de Shaunl/E+/Getty Images

Diseño de la portada por Chip Kidd

ep_prh_5.4_c0_r1

Para Tracy

Contenido

Prefacio

"Hago matemáticas porque una vez que pruebas un teorema, se mantiene. Para siempre."[1] La afirmación, simple y directa, fue sorprendente. Yo era un estudiante de segundo año en la universidad y le mencioné a un amigo mayor, que durante años me había enseñado vastas áreas de las matemáticas, que estaba escribiendo un trabajo sobre la motivación humana para un curso de psicología que estaba tomando. Su respuesta fue transformadora. Hasta entonces, no había pensado en las matemáticas en términos ni remotamente similares. Para mí, las matemáticas eran un maravilloso juego de precisión abstracta jugado por una comunidad peculiar que se deleitaba con los chistes que giraban sobre las raíces cuadradas o dividían por cero. Pero con su comentario, los engranajes de repente encajaron. *Sí*, pensé. *Ese es el romance de las matemáticas.* La creatividad limitada por la lógica y un conjunto de axiomas dicta cómo las ideas pueden ser manipuladas y combinadas para revelar verdades inquebrantables. Cada triángulo rectángulo dibujado desde antes de Pitágoras y hasta la eternidad satisface el famoso teorema que lleva su nombre. No hay excepciones. Claro, puedes cambiar las suposiciones y encontrarte explorando nuevos reinos, como triángulos dibujados en una superficie curva como la piel de un balón de baloncesto, que pueden hacer que la conclusión de Pitágoras se invierta. Pero arregle sus suposiciones, vuelva a revisar su trabajo, y su resultado estará listo para ser cincelado en piedra. No hay que subir a la cima de la montaña, no hay que vagar por el desierto, no hay que triunfar sobre el inframundo. Puedes sentarte cómodamente en un escritorio y usar papel, lápiz y una mente penetrante para crear algo atemporal.

La perspectiva abrió mi mundo. Nunca me había preguntado *por qué me atraían tanto las matemáticas* y la física. Resolver problemas, aprender cómo se construye el universo, eso es lo que siempre me había cautivado. Ahora me convencí de que me atraían estas disciplinas porque estaban por encima de la naturaleza impermanente de lo cotidiano. Por muy exageradas que fueran mis sensibilidades juveniles, estaba seguro de que quería formar parte de un viaje hacia conocimientos tan fundamentales que nunca cambiarían. Dejar que los gobiernos suban y bajen, dejar que las Series Mundiales se ganen y se pierdan, dejar que las leyendas del cine, la televisión y el escenario vengan y se vayan. Quería pasar mi vida vislumbrando algo trascendental.

Mientras tanto, todavía tenía que escribir ese trabajo de psicología. La tarea era desarrollar una teoría de por qué los humanos hacemos lo que hacemos, pero cada vez que empecé a escribir, el proyecto parecía decididamente nebuloso. Si uno se vestía con ideas razonables en el lenguaje correcto, parecía que podía inventarlas sobre la marcha. Mencioné esto durante la cena en mi dormitorio y uno de los asesores residentes me sugirió que echara un vistazo a Declive del Oeste de Oswald Spengler. Un historiador y filósofo

alemán, Spengler tenía un interés permanente en las matemáticas y la ciencia, sin duda la misma razón por la que su libro había sido recomendado.

Los aspectos responsables de la fama y el desdén del libro - predicciones de implosión política, una velada esponsalización del fascismo - son profundamente preocupantes y desde entonces se han utilizado para apoyar ideologías insidiosas, pero yo estaba demasiado enfocado para registrar todo esto. En cambio, me intrigaba la visión de Spengler de un conjunto de principios que lo abarcara todo y que revelara patrones ocultos que se desarrollaban en culturas dispares, a la par de los patrones articulados por el cálculo y la geometría euclidiana que habían transformado la comprensión en la física y las matemáticas. [2] Spengler hablaba mi idioma. Fue inspirador que un texto sobre historia venerara las matemáticas y la física como un modelo para el progreso. Pero entonces llegó una observación que me cogió totalmente por sorpresa: "El hombre es el único ser que conoce la muerte; todos los demás envejecen, pero con una conciencia totalmente limitada al momento que debe parecerles eterno", un conocimiento que inculca el "miedo esencialmente humano en presencia de la muerte". Spengler concluyó que "cada religión, cada investigación científica, cada filosofía procede de ella".[3]

Recuerdo haberme detenido en la última línea. Aquí había una perspectiva de la motivación humana que tenía sentido para mí. El encanto de una prueba matemática podría ser que se mantiene para siempre. El atractivo de una ley de la naturaleza podría ser su cualidad atemporal. ¿Pero qué nos impulsa a buscar lo eterno, a buscar cualidades que pueden durar para siempre? Tal vez todo viene de nuestra singular conciencia de que somos todo menos eternos, que nuestras vidas son todo menos eternas. Resonando con mi nuevo pensamiento en matemáticas, física y el encanto de la eternidad, esto se siente en el blanco. Fue un acercamiento a la motivación humana basado en una reacción plausible a un reconocimiento generalizado. Fue un enfoque que no se inventó sobre la marcha.

Mientras seguía pensando en esta conclusión, parecía prometer algo aún más grandioso. La ciencia, como señaló Spengler, es una respuesta al conocimiento de nuestro ineludible fin. Y también lo es la religión. Y también lo es la filosofía. Pero, en realidad, ¿por qué detenerse ahí? De acuerdo con Otto Rank, uno de los primeros discípulos de Freud que estaba fascinado por el proceso creativo humano, seguramente no deberíamos. El artista, en la evaluación de Rank, es alguien cuyo "impulso creativo... intenta convertir la vida efímera en inmortalidad personal". [4] Jean-Paul Sartre fue más lejos, señalando que la vida misma se vacía de significado "cuando se ha perdido la ilusión de ser eterno". [5] La sugerencia, entonces, enhebrando su camino a través de estos y otros pensadores que le siguieron, es que gran parte de la cultura humana, desde la exploración artística hasta el descubrimiento científico, está impulsada por la vida reflexionando sobre la naturaleza finita de la vida.

Aguas profundas. ¿Quién sabía que la preocupación por todas las cosas de matemáticas y física se convertiría en visiones de una teoría unificada de la civilización humana impulsada por la rica dualidad de la vida y la muerte?

Bueno, está bien. Me tomaré un respiro para recordarme a mí mismo de segundo año que no me deje llevar demasiado. Sin embargo, la emoción que sentí demostró ser más que un asombro intelectual pasajero. En las casi cuatro décadas que han pasado, estos temas, que a menudo se han quedado en un segundo plano mental, se han quedado conmigo. Mientras que mi trabajo diario ha perseguido teorías unificadas y orígenes cósmicos, al

rumiar sobre la mayor importancia de los avances científicos me he encontrado volviendo repetidamente a cuestiones de tiempo y a la limitada asignación que se nos da a cada uno. Ahora, por entrenamiento y temperamento, soy escéptico de las explicaciones únicas - la física está llena de teorías unificadas sin éxito de las fuerzas de la naturaleza - sólo más si nos aventuramos en el complejo reino del comportamiento humano. De hecho, he llegado a ver que mi conciencia de mi propio final inevitable tiene una influencia considerable pero no proporciona una explicación general para todo lo que hago. Es una evaluación, me imagino, que en diversos grados es común. Aún así, hay un dominio en el que los tentáculos de la mortalidad son particularmente evidentes.

A través de las culturas y de las épocas, hemos dado un valor significativo a la permanencia. Las formas en que lo hemos hecho son abundantes: algunos buscan la verdad absoluta, otros se esfuerzan por legados duraderos, algunos construyen monumentos formidables, otros persiguen leyes inmutables, y otros aún se vuelven con fervor hacia una u otra versión de lo eterno. La eternidad, como demuestran estas preocupaciones, tiene un poderoso tirón en la mente consciente de que su duración material es limitada.

En nuestra era, los científicos equipados con las herramientas de experimentación, observación y análisis matemático han abierto un nuevo camino hacia el futuro, uno que por primera vez ha revelado características prominentes del eventual, aunque todavía lejano, futuro paisaje. Aunque oscurecido por la niebla de aquí y la niebla de allá, el panorama se está volviendo lo suficientemente claro como para que nosotros, las criaturas cogitantes, podamos deducir más plenamente que nunca cómo encajamos en la gran extensión del tiempo.

Es con este espíritu, en las páginas que siguen, que caminaremos por la línea de tiempo del universo, explorando los principios físicos que dan lugar a estructuras ordenadas de las estrellas y galaxias a la vida y la conciencia, dentro de un universo destinado a la decadencia. Consideraremos los argumentos que establecen que así como los seres humanos tienen una duración de vida limitada, también lo hacen los propios fenómenos de la vida y la mente en el universo. De hecho, en algún momento es probable que la materia organizada de cualquier tipo no sea posible. Examinaremos cómo los seres autorreflexivos se enfrentan a la tensión que conlleva estas realizaciones. Emergeremos de leyes que, por lo que podemos decir, son atemporales, y sin embargo existimos por el momento más breve de tiempo. Nos guiamos por leyes que operan sin preocuparse por el destino, y sin embargo nos preguntamos constantemente hacia dónde nos dirigimos. Estamos formados por leyes que parecen no requerir un fundamento subyacente, y sin embargo buscamos persistentemente un significado y un propósito.

En resumen, estudiaremos el universo desde el comienzo del tiempo hasta algo parecido al final, y a través del viaje exploraremos las impresionantes formas en que las mentes inquietas e inventivas han iluminado y respondido a la transitoriedad fundamental de todo.

Nos guiaremos en la exploración por los conocimientos de una variedad de disciplinas científicas. A través de analogías y metáforas, explico todas las ideas necesarias en

términos no técnicos, suponiendo sólo los antecedentes más modestos. Para los conceptos particularmente desafiantes, proporciono breves resúmenes que permiten seguir adelante sin perder el rastro. En las notas finales explico puntos más finos, explico detalles matemáticos particulares, y proporciono referencias y sugerencias para una lectura más profunda.

Debido a que el tema es vasto y nuestras páginas limitadas, he elegido caminar por un camino estrecho, deteniéndome en varias coyunturas que considero esenciales para reconocer nuestro lugar dentro de la gran historia cosmológica. Es un viaje impulsado por la ciencia, al que la humanidad le ha dado importancia, y la fuente de una vigorosa y enriquecedora aventura.

1

LA ATRACCIÓN DE LA ETERNIDAD

Comienzos, finales y más allá

En la plenitud del tiempo todo lo que vive morirá. Durante más de tres mil millones de años, a medida que las especies simples y complejas encontraban su lugar en la jerarquía de la Tierra, la guadaña de la muerte ha proyectado una sombra persistente sobre el florecimiento de la vida. La diversidad se extendió a medida que la vida se arrastraba desde los océanos, pisaba la tierra y volaba por los cielos. Pero espera lo suficiente y el libro de cuentas de nacimiento y muerte, con entradas más numerosas que las estrellas de la galaxia, se equilibrará con una precisión desapasionada. El desarrollo de cualquier vida está más allá de toda predicción. El destino final de cualquier vida es una conclusión predecible.

Y sin embargo, este final inminente, tan inevitable como la puesta del sol, es algo que sólo nosotros los humanos parecemos notar. Mucho antes de nuestra llegada, el estruendoso aplauso de las nubes de tormenta, la fuerza furiosa de los volcanes, los temblores de una tierra temblorosa seguramente enviaron todo con el poder de escabullirse. Pero tales vuelos son una reacción instintiva a un peligro presente. La mayoría de la vida vive en el momento, con el miedo nacido de la percepción inmediata. Sólo tú y yo y el resto de nosotros podemos reflexionar sobre el pasado lejano, imaginar el futuro y captar la oscuridad que nos espera.

Es aterrador. No es el tipo de terror que nos hace retroceder o correr para cubrirnos. Es más bien una premonición que vive tranquilamente dentro de nosotros, una que aprendemos a apisonar, a aceptar, a tomar en cuenta. Pero debajo de las capas de oscurecimiento está el siempre presente e inquietante hecho de lo que nos espera, un conocimiento que William James describió como el "gusano en el centro de todos nuestros habituales manantiales de placer". [1] Trabajar y jugar, anhelar y esforzarse, anhelar y amar, todo esto nos une cada vez más al tapiz de las vidas que compartimos, y para que todo esto desaparezca, bueno, para parafraseando a Steven Wright, es suficiente para asustarte hasta la muerte. Dos veces.

Por supuesto, la mayoría de nosotros, al servicio de la cordura, no nos fijamos en el final. Vamos por el mundo enfocados en las preocupaciones mundanas. Aceptamos lo

inevitable y dirigimos nuestras energías a otras cosas. Sin embargo, el reconocimiento de que nuestro tiempo es finito está siempre con nosotros, ayudando a dar forma a las elecciones que hacemos, los desafíos que aceptamos, los caminos que seguimos. Como sostuvo el antropólogo cultural Ernest Becker, estamos bajo una constante tensión existencial, arrastrados hacia el cielo por una conciencia que puede elevarse a las alturas de Shakespeare, Beethoven y Einstein, pero atados a la tierra por una forma física que se descompondrá en polvo. "El hombre está literalmente partido en dos: tiene conciencia de su propia espléndida singularidad en que sobresale de la naturaleza con una majestad imponente, y sin embargo vuelve a la tierra unos pocos metros para, ciega y tontamente, pudrirse y desaparecer para siempre". [2] Según Becker, estamos impulsados por tal conciencia a negar a la muerte la capacidad de borrarnos. Algunos calman el anhelo existencial a través del compromiso con la familia, un equipo, un movimiento, una religión, una nación-construcciones que durarán más tiempo que el tiempo asignado al individuo en la tierra. Otros dejan atrás expresiones creativas, artefactos que prolongan simbólicamente la duración de su presencia. "Volamos a la belleza", dijo Emerson, "como un asilo de los terrores de la naturaleza finita". [3] Otros aún buscan vencer a la muerte ganando o conquistando, como si la estatura, el poder y la riqueza mandaran una inmunidad no disponible para el mortal común.

A través de los milenios, una consecuencia ha sido una amplia fascinación por todas las cosas, reales o imaginarias, que tocan lo intemporal. Desde las profecías de una vida después de la muerte, a las enseñanzas de la reencarnación, a las súplicas del mandala azotado por el viento, hemos desarrollado estrategias para lidiar con el conocimiento de nuestra impermanencia y, a menudo con la esperanza, a veces con la resignación, para hacer un gesto hacia la eternidad. Lo que es nuevo en nuestra era es el notable poder de la ciencia para contar una lúcida historia no sólo del pasado, de vuelta al big bang, sino también del futuro. La propia eternidad puede estar para siempre fuera del alcance de nuestras ecuaciones, pero nuestros análisis ya han revelado que el universo que hemos llegado a conocer es transitorio. Desde los planetas a las estrellas, los sistemas solares a las galaxias, los agujeros negros a las nebulosas giratorias, nada es eterno. De hecho, hasta donde podemos decir, no sólo cada vida individual es finita, sino que también lo es la vida misma. El planeta Tierra, que Carl Sagan describió como una "mota de polvo suspendida en un rayo solar", es un florecimiento evanescente en un exquisito cosmos que finalmente será estéril. Las motas de polvo, cercanas o lejanas, danzan sobre los rayos de sol por un momento.

Sin embargo, aquí en la tierra hemos puntuado nuestro momento con asombrosas hazañas de perspicacia, creatividad e ingenio a medida que cada generación ha construido sobre los logros de los que han ido antes, buscando claridad sobre cómo llegó todo a ser, persiguiendo la coherencia en donde todo va, y anhelando una respuesta a por qué todo esto importa.

Tal es la historia de este libro.

Historias de casi todo

Somos una especie que se deleita con la historia. Miramos la realidad, captamos los patrones y los unimos en narraciones que pueden cautivar, informar, asustar, divertir y

emocionar. El plural de las narraciones es completamente esencial. En la biblioteca de la reflexión humana, no hay un solo volumen unificado que transmita la comprensión definitiva. En su lugar, hemos escrito muchas historias anidadas que exploran diferentes dominios de la investigación y la experiencia humanas: historias, es decir, que analizan los patrones de la realidad utilizando diferentes gramáticas y vocabularios. Los protones, neutrones, electrones y otras partículas de la naturaleza son esenciales para contar la historia reduccionista, analizando la materia de la realidad, desde los planetas hasta Picasso, en términos de sus constituyentes microfísicos. El metabolismo, la replicación, la mutación y la adaptación son esenciales para contar la historia del surgimiento y desarrollo de la vida, analizando el funcionamiento bioquímico de las moléculas notables y las células que gobiernan. Las neuronas, la información, el pensamiento y la conciencia son esenciales para la historia de la mente, y con ello proliferan las narraciones: del mito a la religión, de la literatura a la filosofía, del arte a la música, la narración de la lucha de la humanidad por la supervivencia, la voluntad de comprender, el impulso de expresión y la búsqueda de sentido.

Todas estas son historias en curso, desarrolladas por pensadores que provienen de una gran variedad de disciplinas distintas. Es comprensible. Una saga que va desde los quarks hasta la conciencia es una crónica importante. Sin embargo, las diferentes historias están entrelazadas. *Don Quijote* habla del anhelo de la humanidad por lo heroico, contado a través del frágil Alonso Quijano, un personaje creado en la imaginación de Miguel de Cervantes, un conjunto vivo, que respira, piensa, siente, siente, de huesos, tejidos y células que, durante su vida, apoyaban los procesos orgánicos de transformación de la energía y la excreción de desechos, que a su vez dependían de los movimientos atómicos y moleculares perfeccionados por miles de millones de años de evolución en un planeta forjado a partir de los detritos de las explosiones de supernovas esparcidas por todo un reino del espacio que surgía del big bang. Sin embargo, leer los esfuerzos de Don Quijote es adquirir una comprensión de la naturaleza humana que permanecería opaca si se incorporara a una descripción de los movimientos de las moléculas y los átomos del caballero andante o se transmitiera a través de una elaboración de los procesos neuronales que crepitaban en la mente de Cervantes mientras escribía la novela. Conectadas aunque seguramente lo estén, diferentes historias, contadas con diferentes idiomas y enfocadas a diferentes niveles de la realidad, proveen de una comprensión muy diferente.

Tal vez algún día podamos transitar sin problemas entre estas historias, conectando todos los productos de la mente humana, reales y ficticios, científicos e imaginativos. Quizás algún día invoquemos una teoría unificada de los ingredientes de las partículas para explicar la abrumadora visión de un Rodin y las innumerables respuestas que los habitantes de *Calais obtienen* de aquellos que la experimentan. Tal vez comprendamos plenamente cómo lo aparentemente mundano, un destello de luz que se refleja en un plato de cena giratorio, puede agitarse en la poderosa mente de un Richard Feynman y obligarlo a reescribir las leyes fundamentales de la física. Más ambicioso aún, quizás algún día entenderemos el funcionamiento de la mente y la materia tan completamente que todo quedará al descubierto, desde los agujeros negros hasta Beethoven, desde las rarezas cuánticas hasta Walt Whitman. Pero incluso sin tener nada ni remotamente cercano a esa

capacidad, hay mucho que ganar al sumergirse en estas historias -científicas, creativas, imaginativas- apreciando cuándo y cómo surgieron de las anteriores, jugando en la línea de tiempo cósmica y trazando los desarrollos, tanto controvertidos como concluyentes, que elevaron a cada una a su lugar de prominencia explicativa.[4]

A lo largo de la colección de historias, encontraremos dos fuerzas que comparten el papel de protagonista. En el capítulo 2 nos encontraremos con la primera: *la entropía.* Aunque es familiar para muchos por su asociación con el desorden y la declaración a menudo citada de que el desorden está siempre en aumento, la entropía tiene cualidades sutiles que permiten que los sistemas físicos se desarrollen en una rica variedad de formas, a veces incluso pareciendo nadar contra la corriente entrópica. Veremos importantes ejemplos de ello en el capítulo 3, ya que las partículas en el período posterior al big bang parecen burlar el impulso hacia el desorden a medida que evolucionan en estructuras organizadas como estrellas, galaxias y planetas y, en última instancia, en configuraciones de materia que surgen con la corriente de la vida. Preguntarse cómo esa corriente se encendió nos lleva al segundo de nuestras influencias dominantes: *la evolución.*

Aunque es el principal impulsor de las transformaciones graduales experimentadas por los sistemas vivos, la evolución por selección natural se pone en marcha mucho antes de que las primeras formas de vida empiecen a competir. En el capítulo 4, nos encontraremos con moléculas que luchan contra moléculas, luchas por la supervivencia libradas en una arena de materia inanimada. Ronda tras ronda del darwinismo molecular, como se llama este combate químico, es lo que probablemente produjo una serie de configuraciones cada vez más robustas que finalmente dieron lugar a las primeras colecciones moleculares que reconoceríamos como vida. Los detalles son materia de investigación de vanguardia, pero con el último par de décadas de estupendo progreso, el consenso es que vamos por el buen camino. De hecho, puede ser que las fuerzas duales de la entropía y la evolución sean socios bien parecidos en el camino hacia el surgimiento de la vida. Si bien esto podría parecer un extraño acoplamiento: la entropía gira en torno al caos, aparentemente la antítesis de la evolución o de la vida: los recientes análisis matemáticos de la entropía sugieren que la vida, o al menos las cualidades de la vida, podrían ser el producto esperado de una fuente de energía de larga duración, como el sol, que hace llover implacablemente calor y luz sobre los ingredientes moleculares que compiten por los limitados recursos disponibles en un planeta como la Tierra.

Aunque algunas de estas ideas son provisionales, lo que es seguro es que mil millones de años después de que la Tierra se formara, estaba repleta de vida desarrollándose bajo presión evolutiva, por lo que la siguiente fase de desarrollo es la normalidad darwiniana. Los acontecimientos fortuitos, como ser alcanzado por un rayo cósmico o sufrir un percance molecular durante la replicación del ADN, dan lugar a mutaciones aleatorias, algunas con un impacto mínimo en la salud o el bienestar del organismo, pero otras que lo hacen más o menos apto para la competencia por la supervivencia. Las mutaciones que mejoran la aptitud física tienen más probabilidades de transmitirse a los descendientes porque el significado mismo de "más apto" es que el portador del rasgo tiene más probabilidades de sobrevivir hasta la madurez reproductiva y de producir descendientes

aptos. De generación en generación, las cualidades que mejoran la aptitud física se difunden ampliamente.

Miles de millones de años más tarde, a medida que este largo proceso continuaba desarrollándose, un conjunto particular de mutaciones proporcionó a algunas formas de vida una mayor capacidad de cognición. Algunas vidas no sólo se hicieron conscientes, sino que se hicieron conscientes de ser conscientes. Es decir, algunas vidas adquirieron conciencia de sí mismas. Tales seres autorreflexivos se han preguntado naturalmente qué es la conciencia y cómo surgió: ¿Cómo puede un remolino de materia sin mente pensar y sentir? Varios investigadores, como veremos en el capítulo 5, anticipan una explicación mecanicista. Argumentan que necesitamos entender el cerebro -sus componentes, sus funciones, sus conexiones- con mucha más fidelidad que ahora, pero una vez que tengamos ese conocimiento, seguirá una explicación de la conciencia. Otros anticipan que nos enfrentamos a un desafío mucho mayor, argumentando que la conciencia es el enigma más difícil que hemos encontrado nunca, uno que requerirá perspectivas radicalmente nuevas respecto no sólo a la mente sino también a la naturaleza misma de la realidad.

Las opiniones convergen al evaluar el impacto que nuestra sofisticación cognitiva ha tenido en nuestro repertorio conductual. A través de decenas de miles de generaciones durante el Pleistoceno, nuestros antepasados se unieron en grupos que subsistían a través de la caza y la recolección. Con el tiempo, una destreza mental emergente les proporcionó capacidades refinadas para planificar y organizar y comunicar y enseñar y evaluar y juzgar y resolver problemas. Aprovechando estas capacidades mejoradas del individuo, los grupos ejercieron fuerzas comunales cada vez más influyentes. Lo que nos lleva a la siguiente colección de episodios explicativos, aquellos enfocados en los desarrollos que nos hicieron ser nosotros. En el capítulo 6 examinamos nuestra adquisición del lenguaje y la subsiguiente obsesión por contar historias; el capítulo 7 sondea un género particular de historias, las que prefiguran y se transforman en tradiciones religiosas; y en el capítulo 8 exploramos la antigua y extendida búsqueda de la expresión creativa.

Al buscar el origen de estos desarrollos, tanto comunes como sagrados, los investigadores han invocado una amplia gama de explicaciones. Para nosotros, una luz guía esencial seguirá siendo la evolución darwiniana, aplicada ahora al comportamiento humano. El cerebro, después de todo, no es más que otra estructura biológica que evoluciona a través de presiones de selección, y es el cerebro el que informa lo que hacemos y cómo respondemos. En las últimas décadas, los científicos cognitivos y los psicólogos evolutivos han desarrollado esta perspectiva, estableciendo que así como nuestra biología ha sido moldeada por las fuerzas de la selección darwiniana, también lo ha sido nuestro comportamiento. Y así, en nuestro viaje a través de la cultura humana, a menudo nos preguntaremos si este o aquel comportamiento puede haber mejorado las perspectivas de supervivencia y reproducción entre aquellos que hace tiempo lo practicaron, promoviendo su amplia propagación a través de generaciones de descendientes. Sin embargo, a diferencia del pulgar oponible o la marcha erguida -características fisiológicas heredadas estrechamente ligadas a comportamientos adaptativos específicos- muchas de las características heredadas del cerebro moldean predilecciones más que acciones definitivas.

Estamos influenciados por estas predisposiciones, pero la actividad humana emerge de una mezcla de tendencias de comportamiento con nuestras mentes complejas, deliberativas y autorreflexivas.

Y así una segunda luz guía, distinta pero no menos importante, se entrenará en la vida interior que viene de la mano de nuestras refinadas capacidades cognitivas. Siguiendo un camino marcado por muchos pensadores, llegaremos a una visión reveladora: con la cognición humana seguramente aprovechamos una fuerza poderosa, que con el tiempo nos elevó a la especie dominante en todo el mundo. Pero las facultades mentales que nos permiten moldear e innovar son las mismas que disipan la miopía que de otro modo nos mantendría estrechamente centrados en el presente. La capacidad de manipular el entorno de forma reflexiva proporciona la capacidad de cambiar nuestro punto de vista, para flotar sobre la línea de tiempo y contemplar lo que fue e imaginar lo que será. Por mucho que preferiríamos que fuera de otra manera, lograr el "Pienso, luego existo" es correr de cabeza hacia la réplica "Soy, luego moriré".

Dicho suavemente, la realización es desconcertante. Sin embargo, la mayoría de nosotros puede soportarlo. Y nuestra supervivencia como especie atestigua que nuestros hermanos también han sido capaces de soportarlo. ¿Pero cómo lo hacemos? [5] Según una línea de pensamiento, contamos y volvemos a contar historias en las que nuestro lugar en un vasto universo migra al centro del escenario, y la posibilidad de que se nos borre permanentemente es desafiada o ignorada - o, simplemente, no está en las cartas. Hacemos trabajos de pintura, escultura, movimiento y música en los que tomamos el control de la creación y nos investimos con el poder de triunfar sobre todas las cosas finitas. Imaginamos héroes, desde Hércules a Sir Gawain y Hermione, que miran fijamente a la muerte con una determinación de acero y demuestran, aunque con fantasía, que podemos conquistar. Desarrollamos la ciencia, proporcionando una visión del funcionamiento de la realidad que transformamos en poderes que las generaciones anteriores habrían reservado para los dioses. En resumen, podemos tener nuestro pastel cognitivo, la agilidad de pensamiento que, entre otras cosas, revela nuestra predicción existencial, y disfrutar de comerlo también. A través de nuestras capacidades creativas hemos desarrollado formidables defensas contra lo que de otra manera hubiera sido una inquietud debilitante.

De todos modos, como los motivos no se fosilizan, rastrear la inspiración del comportamiento humano puede ser una tarea complicada. Tal vez nuestras incursiones creativas, desde los ciervos de Lascaux hasta las ecuaciones de la relatividad general, emergen de la habilidad naturalmente seleccionada pero demasiado activa del cerebro para detectar y organizar coherentemente los patrones. Tal vez estas y otras actividades relacionadas son subproductos exquisitos pero adaptables y superfluos de un cerebro suficientemente grande liberado del enfoque de tiempo completo en asegurar el refugio y el sustento. Como discutiremos, las teorías abundan pero las conclusiones incuestionables son difíciles de alcanzar. Lo que está fuera de duda es que imaginamos, creamos y experimentamos obras, desde las Pirámides hasta la Novena Sinfonía y la mecánica cuántica, que son monumentos al ingenio humano cuya durabilidad, si no cuyo contenido, apuntan hacia la permanencia.

Y con eso, habiendo considerado los orígenes cósmicos, explorado la formación de los átomos, estrellas y planetas, y barrido el surgimiento de la vida, la conciencia y la cultura, pondremos nuestra mirada en el mismo reino que durante milenios, literal y simbólicamente, ha estimulado y sofocado nuestra ansiedad cósmica. Miraremos, es decir, desde aquí hasta la eternidad.

Información, Conciencia y Eternidad

La eternidad tardará mucho en llegar. Muchas cosas sucederán en el camino. Los futuristas sin aliento y los espectaculares de ciencia ficción de Hollywood imaginan cómo será la vida y la civilización en un lapso que, aunque significativo para los estándares humanos, palidece en comparación con las escalas de tiempo cósmicas. Es un pasatiempo entretenido extrapolar de un corto período de innovación tecnológica exponencial a los acontecimientos futuros, pero es probable que esas predicciones difieran profundamente de la forma en que las cosas se desarrollarán realmente. Y eso es a lo largo de duraciones relativamente familiares de décadas, siglos y milenios. En escalas de tiempo cósmicas, predecir este tipo de detalles es una tontería. Afortunadamente, para la mayoría de lo que exploraremos aquí, nos encontraremos en terreno más sólido. Mi intención es que pintemos el futuro del universo con ricos colores pero sólo con el más amplio de los trazos. Y con ese nivel de detalle, podemos retratar las posibilidades con un grado razonable de confianza.

Un reconocimiento esencial es que hay poca ecuanimidad emocional que se gane al dejar un rastro en un futuro sin que nadie lo note. El futuro que tendemos a imaginar, aunque sea implícitamente, es uno que está poblado por el tipo de cosas que nos importan. La evolución seguramente llevará a la vida y a la mente a adoptar una gran cantidad de formas apoyadas por una serie de plataformas: biológicas, computacionales, híbridas y quién sabe qué más. Pero independientemente de los detalles impredecibles de la composición física o del entorno, la mayoría de nosotros imaginamos que en un futuro muy lejano, la vida de alguna franja, y la vida inteligente más particularmente, existirá y pensará.

Y esto plantea una pregunta que nos acompañará durante todo el viaje: ¿Puede el pensamiento consciente persistir indefinidamente? ¿O puede la mente pensante, como el tigre de Tasmania o el pájaro carpintero de pico de marfil, ser algo sublime que se eleva durante un período pero luego se extingue? No estoy enfocado en ninguna conciencia individual, así que la pregunta no tiene nada que ver con las tecnologías deseadas - criogénicas, digitales, lo que sea - capaces de preservar una mente dada. En su lugar, me pregunto si el fenómeno del pensamiento, apoyado por un cerebro humano o un ordenador inteligente o partículas enredadas que flotan en el vacío o cualquier otro proceso físico que resulte relevante, puede persistir arbitrariamente hasta el futuro.

¿Por qué no lo haría? Bueno, piensa en la encarnación humana del pensamiento. Surgió en conjunto con un conjunto fortuito de condiciones ambientales que explican por qué, por ejemplo, nuestro pensamiento tiene lugar aquí y no en Mercurio o en el cometa Halley. Pensamos aquí porque las condiciones aquí son hospitalarias para la vida y el pensamiento,

por lo que los cambios deletéreos en el clima de la Tierra son tan angustiosos. Lo que no es del todo obvio es que hay una versión cósmica de tales preocupaciones consecuentes pero parroquiales. Al pensar en el pensamiento como un proceso físico (una suposición que examinaremos), no es sorprendente que el pensamiento sólo pueda tener lugar cuando se cumplen ciertas condiciones ambientales estrictas, ya sea en la Tierra en el aquí y ahora o en algún otro lugar en el allí y entonces. Y así, al considerar la evolución general del universo, determinaremos si las condiciones ambientales en evolución a través del espacio y el tiempo pueden soportar la vida inteligente indefinidamente.

La evaluación se guiará por los conocimientos de la investigación en física de partículas, astrofísica y cosmología que nos permiten predecir cómo se desarrollará el universo en épocas que empequeñecen la línea temporal hasta el estallido. Hay significativas incertidumbres, por supuesto, y como la mayoría de los científicos, vivo para la posibilidad de que la naturaleza nos dé una bofetada y revele sorpresas que aún no podemos comprender. Pero centrándonos en lo que hemos medido, en lo que hemos observado y en lo que hemos calculado, lo que encontraremos, como se expone en los capítulos 9 y 10, no es alentador. Los planetas y las estrellas y los sistemas solares y las galaxias e incluso los agujeros negros son transitorios. El final de cada uno es impulsado por su propia combinación distintiva de procesos físicos, abarcando la mecánica cuántica a través de la relatividad general, produciendo en última instancia una niebla de partículas a la deriva a través de un cosmos frío y tranquilo.

¿Cómo le irá al pensamiento consciente en un universo que experimenta tal transformación? El lenguaje para preguntar y responder a esta pregunta es proporcionado una vez más por la entropía. Y siguiendo el rastro de la entropía nos encontraremos con la posibilidad demasiado real de que el propio acto de pensar, realizado por cualquier entidad de cualquier tipo en cualquier lugar, pueda ser frustrado por una inevitable acumulación de residuos ambientales: en un futuro lejano, cualquier cosa que piense puede arder en el calor generado por sus propios pensamientos. El pensamiento en sí mismo puede volverse físicamente imposible.

Si bien el caso contra el pensamiento interminable se basará en un conjunto conservador de supuestos, también consideraremos alternativas, futuros posibles más propicios para la vida y el pensamiento. Pero la lectura más directa sugiere que la vida, y la vida inteligente en particular, es efímera. El intervalo en la línea de tiempo cósmica en el que las condiciones permiten la existencia de seres autorreflexivos puede ser extremadamente estrecho. Eche un vistazo rápido a todo el conjunto, y podría perderse la vida por completo. La descripción de Nabokov de una vida humana como un "breve resquicio de luz entre dos eternidades de oscuridad" [6] puede aplicarse al fenómeno de la vida misma.

Lloramos nuestra transitoriedad y nos reconfortamos en una trascendencia simbólica, el legado de haber participado en el viaje en absoluto. Tú y yo no estaremos aquí, pero otros sí, y lo que tú y yo hacemos, lo que tú y yo creamos, lo que tú y yo dejamos atrás contribuye a lo que será y a cómo vivirá la vida futura. Pero en un universo que en última instancia estará desprovisto de vida y conciencia, incluso un legado simbólico - un susurro destinado a nuestros lejanos descendientes - desaparecerá en el vacío.

Entonces, ¿dónde nos deja eso?

Reflexiones sobre el futuro

Tendemos a absorber intelectualmente los descubrimientos sobre el universo. Aprendemos algún nuevo hecho sobre el tiempo o teorías unificadas o agujeros negros. Momentáneamente hace cosquillas en la mente, y si es suficientemente impresionante, se pega. La naturaleza abstracta de la ciencia a menudo nos lleva a detenernos en su contenido cognitivo, y sólo entonces, y sólo en raras ocasiones, esa comprensión tiene la oportunidad de tocarnos visceralmente. Pero en las ocasiones en que la ciencia conjura tanto la razón como la emoción, el resultado puede ser poderoso.

Un ejemplo de ello: Hace algunos años, cuando empecé a pensar en las predicciones científicas sobre el futuro lejano del universo, mi experiencia fue mayormente cerebral. Absorbí material relevante como una fascinante pero abstracta colección de ideas relacionadas con las matemáticas de las leyes de la naturaleza. Sin embargo, descubrí que si me presionaba para imaginar *realmente* que toda la vida, todos los pensamientos, todas las luchas y todos los logros eran una aberración fugaz en una línea de tiempo cósmica sin vida, lo absorbía de forma diferente. Podía sentirlo. Podía sentirlo. Y no me importa compartir que las primeras veces que fui allí, el viaje fue oscuro. A través de décadas de estudio e investigación científica, a menudo he tenido momentos de euforia y asombro, pero nunca antes los resultados en matemáticas y física me abrumaron con un temor hueco.

Con el tiempo, mi compromiso emocional con estas ideas se ha ido refinando. Ahora, la mayoría de las veces, contemplar el futuro lejano me deja con un sentimiento de calma y conexión, como si mi propia identidad apenas importara porque ha sido subsumida por lo que sólo puedo describir como un sentimiento de gratitud por el regalo de la experiencia. Ya que, muy probablemente, no me conoce personalmente, permítame poner esto en contexto. Soy de mente abierta con una sensibilidad que exige rigor. Vengo de un mundo en el que se argumenta con ecuaciones y datos replicables, un mundo en el que la validez se determina por cálculos inequívocos que arrojan predicciones que coinciden con experimentos dígito a dígito, a veces hasta una docena de lugares más allá del punto decimal. Así que la primera vez que tuve uno de estos momentos de conexión tranquila, en un Starbucks de Nueva York, me sentí profundamente sospechoso. Tal vez mi Earl Grey estaba contaminado con un poco de leche de soja en mal estado. O quizás estaba perdiendo la cabeza.

Reflexionando, tampoco fue el caso. Somos el producto de un largo linaje que ha aliviado su incomodidad existencial al prever que dejamos una huella. Y cuanto más duradera es la marca, más indeleble es su huella, más parece que una vida es una vida que importa. En palabras del filósofo Robert Nozick, pero también podrían provenir de George Bailey- "La muerte te aniquila... Ser aniquilado por completo, con sus huellas y todo, es un gran paso hacia la destrucción del significado de la vida." [7] Especialmente para aquellos, como yo, sin una orientación religiosa tradicional, el énfasis en no ser "aniquilado", un enfoque implacable en la resistencia, puede impregnarlo todo. Mi crianza, mi educación, mi carrera, mis experiencias han sido informadas por ello. Durante cada etapa, he seguido

adelante con un ojo entrenado en la visión a largo plazo, en la búsqueda de lograr algo que duraría. No es ningún misterio por qué mi preocupación profesional ha estado dominada por los análisis matemáticos del espacio, el tiempo y las leyes de la naturaleza; es difícil imaginar otra disciplina que mantenga más fácilmente los pensamientos cotidianos de uno centrados en cuestiones que trascienden el momento. Pero el propio descubrimiento científico arroja esta perspectiva bajo una luz diferente. La vida y el pensamiento probablemente pueblan un diminuto oasis en la línea de tiempo cósmica. Aunque está gobernado por elegantes leyes matemáticas que permiten todo tipo de procesos físicos maravillosos, el universo acogerá la vida y la mente sólo temporalmente. Si se toma esto en su totalidad, imaginando un futuro sin estrellas, planetas y cosas que piensen, su consideración por nuestra era puede apreciarse hacia la reverencia.

Y *esa* es la sensación que experimenté en Starbucks. La calma y la conexión marcaron un cambio, desde la búsqueda de un futuro en retroceso a la sensación de habitar un presente impresionante aunque transitorio. Fue un cambio, para mí, impulsado por una contraparte cosmológica a la guía ofrecida a través de los tiempos por poetas y filósofos, escritores y artistas, sabios espirituales y maestros de la mente, entre otros incontables que nos dicen la simple pero sorprendentemente sutil verdad de que la vida está en el aquí y ahora. Es una mentalidad difícil de mantener pero que ha infundido el pensamiento de muchos. Lo vemos en "Forever-is composed of Nows" [8] de Emily Dickinson y en "eternidad en cada momento" de Thoreau. [9] Es una perspectiva, que he encontrado, que se hace más palpable cuando nos sumergimos en la completa expansión del tiempo, comenzando por el final, un telón de fondo cosmológico que proporciona una claridad inigualable sobre lo singular y fugaz que es realmente el aquí y ahora.

El propósito de este libro es proporcionar esa claridad. Viajaremos a través del tiempo, desde nuestra más refinada comprensión del principio hasta lo más cercano que la ciencia puede llevarnos al final. Exploraremos cómo la vida y la mente emergen del caos inicial, y nos detendremos en lo que hace una colección de mentes curiosas, apasionadas, ansiosas, autorreflexivas, inventivas y escépticas, especialmente cuando notan su propia mortalidad. Examinaremos el surgimiento de la religión, el impulso de la expresión creativa, el ascenso de la ciencia, la búsqueda de la verdad y el anhelo de lo intemporal. La afinidad profundamente arraigada por algo permanente, por lo que Franz Kafka identificó como nuestra necesidad de "algo indestructible", [10] impulsará entonces nuestra continua marcha hacia el futuro lejano, permitiéndonos evaluar las perspectivas de todo lo que nos es querido, todo lo que constituye la realidad tal como la conocemos, desde los planetas y las estrellas, las galaxias y los agujeros negros, hasta la vida y la mente.

A través de todo esto, el espíritu humano de descubrimiento brillará. Somos ambiciosos exploradores que buscan captar una vasta realidad. Siglos de esfuerzo han iluminado oscuros terrenos de materia, mente y el cosmos. Durante los milenios venideros, las esferas de iluminación se harán más grandes y brillantes. El viaje hasta ahora ya ha hecho evidente que la realidad se rige por leyes matemáticas que son indiferentes a los códigos de conducta, normas de belleza, necesidades de compañía, anhelos de comprensión y búsquedas de propósito. Sin embargo, a través del lenguaje y la historia, el arte y el mito, la

religión y la ciencia, hemos aprovechado nuestra pequeña parte del desapasionado, implacable y mecánico despliegue del cosmos para dar voz a nuestra penetrante necesidad de coherencia y valor y significado. Es una contribución exquisita pero temporal. Como nuestro viaje a través del tiempo dejará claro, la vida es probablemente transitoria, y toda la comprensión que surgió con su aparición se disolverá casi con toda seguridad con su conclusión. Nada es permanente. Nada es absoluto. Y así, en la búsqueda de valor y propósito, las únicas percepciones de relevancia, las únicas respuestas de importancia, son las que nosotros mismos hacemos. Al final, durante nuestro breve momento al sol, se nos encomienda la noble tarea de encontrar nuestro propio significado.

Embarquémonos.

2

EL LENGUAJE DEL TIEMPO

Pasado, futuro y cambio

En la noche del 28 de enero de 1948, entre una actuación del Cuarteto Schubert en la menor y una presentación de canciones populares inglesas, la BBC Radio transmitió un debate entre una de las fuerzas intelectuales más potentes del siglo XX, Bertrand Russell, y el sacerdote jesuita Frederick Copleston. [1] ¿El tema? La existencia de Dios. Russell, cuyos escritos innovadores en filosofía y principios humanitarios le harían ganar el Premio Nobel de Literatura de 1950, y cuyas iconoclastas opiniones políticas y sociales le harían ganar un pase de rosca tanto en la Universidad de Cambridge como en el City College de Nueva York, proporcionó numerosos argumentos para cuestionar, si no rechazar, la existencia de un creador.

Una línea de pensamiento que informó la posición de Russell es relevante para nuestra exploración aquí. "En lo que respecta a la evidencia científica", Russell señaló, "el universo se ha arrastrado por etapas lentas hasta un resultado algo lamentable en esta tierra y se va a arrastrar por etapas aún más lamentables hasta una condición de muerte universal". Con un panorama tan sombrío, Russell concluyó, "si esto debe ser tomado como evidencia del propósito, sólo puedo decir que el propósito es uno que no me atrae. No veo ninguna razón, por lo tanto, para creer en ningún tipo de Dios." [2] El hilo teológico será cosido en capítulos posteriores. Aquí, quiero centrarme en la referencia de Russell a la evidencia científica de una "muerte universal". Viene de un descubrimiento del siglo XIX con raíces tan humildes como profundas son sus conclusiones.

A mediados del siglo XIX, la Revolución Industrial estaba en pleno apogeo y en un paisaje de molinos y fábricas la máquina de vapor se había convertido en el caballo de batalla que impulsaba la producción. Sin embargo, incluso con el crítico salto de la mano de obra a la mecánica, la eficiencia de la máquina de vapor -el trabajo útil realizado en

comparación con la cantidad de combustible consumido- era escasa. Aproximadamente el 95 por ciento del calor generado por la quema de madera o carbón se perdía en el medio ambiente como residuo. Esto inspiró a un puñado de científicos a pensar profundamente en los principios físicos que rigen las máquinas de vapor, buscando formas de quemar menos y obtener más. A lo largo de muchas décadas sus investigaciones condujeron gradualmente a un resultado icónico que se ha hecho justamente famoso: *la segunda ley de la termodinámica.*

En términos (muy) coloquiales, la ley declara que la producción de residuos es inevitable. Y lo que hace que la segunda ley sea de vital importancia es que mientras que las máquinas de vapor fueron el catalizador, la ley es universalmente aplicable. La segunda ley describe una característica fundamental inherente a toda la materia y la energía, independientemente de la estructura o la forma, ya sea animada o inanimada. La ley revela (de nuevo, de manera general) que todo en el universo tiene una tendencia abrumadora a agotarse, a degradarse, a marchitarse.

Dicho en estos términos cotidianos se puede ver de dónde venía Russell. El futuro parece contener un continuo deterioro, una implacable conversión de la energía productiva en calor inútil, un constante agotamiento, por así decirlo, de las baterías que alimentan la realidad. Pero una comprensión más precisa de la ciencia revela que este resumen de hacia dónde se dirige la realidad oscurece una progresión rica y matizada, que ha estado en marcha desde el big bang y continuará en el futuro lejano. Es una progresión que ayuda a explicar nuestro lugar en la línea de tiempo cósmica, aclara cómo la belleza y el orden pueden producirse en un contexto de degradación y decadencia, y también ofrece maneras potenciales, aunque exóticas, de evitar el sombrío final que Russell imaginó. Como es esta misma ciencia, que incluye conceptos como la entropía, la información y la energía, la que guiará gran parte de nuestro viaje, vale la pena dedicar un poco de tiempo a comprenderla más plenamente.

Motores de vapor

Lejos de mi intención sugerir que el significado de la vida se encontrará al acecho en las sudorosas profundidades de una clamorosa máquina de vapor. Pero comprender la capacidad de la máquina de vapor para absorber el calor del combustible que se quema y utilizarlo para impulsar el movimiento recurrente en las ruedas de una locomotora o en la bomba de una mina de carbón resulta indispensable para comprender cómo la energía -de cualquier tipo y en cualquier contexto- evoluciona con el tiempo. Y la forma en que la energía evoluciona tiene un profundo impacto en el futuro de la materia, la mente y toda la estructura del universo. Así que descendamos de los elevados reinos de la vida y la muerte y el propósito y el significado, al incesante traqueteo y el ruido de una máquina de vapor del siglo XVIII.

La base científica de la máquina de vapor es simple pero ingeniosa: El vapor de agua se expande cuando se calienta y así empuja hacia afuera. Una máquina de vapor aprovecha esta acción calentando un recipiente lleno de vapor que es tapado por un pistón de ajuste libre para deslizarse hacia arriba y hacia abajo a lo largo de la superficie interior del

recipiente. A medida que el vapor calentado se expande, empuja con fuerza contra el pistón, y ese empuje hacia afuera puede hacer girar una rueda, o moler un molino, o tejer un telar. Entonces, habiendo gastado energía a través de este esfuerzo exterior, el vapor se enfría y el pistón se desliza de nuevo a su posición inicial, donde está listo para ser empujado cuando el vapor se calienta de nuevo, un ciclo que se repetirá mientras haya combustible ardiendo para calentar de nuevo el vapor.[3]

Aunque la historia registra el papel central de la máquina de vapor en la Revolución Industrial, las cuestiones que planteó para la ciencia fundamental fueron igual de significativas. ¿Podemos entender la máquina de vapor con precisión matemática? ¿Existe un límite a la eficiencia de su conversión de calor en actividad útil? ¿Hay aspectos de los procesos básicos de la máquina de vapor que son independientes de los detalles del diseño mecánico o de los materiales utilizados y que por lo tanto hablan de principios físicos universales?

En su perplejidad por estos temas, el físico e ingeniero militar francés Sadi Carnot lanzó el campo de la termodinámica, la ciencia del calor, la energía y el trabajo. No lo habrías sabido por las ventas de su tratado de 1824, Reflexiones *sobre el poder del fuego.* [4] Pero aunque tardaron en ponerse de moda, sus ideas inspirarían a los científicos a lo largo del siguiente siglo para desarrollar una perspectiva radicalmente nueva de la física.

Una perspectiva estadística

La perspectiva científica tradicional, transmitida en forma matemática por Isaac Newton, es que las leyes físicas proveen predicciones firmes de cómo se mueven las cosas. Dime la ubicación y la velocidad de un objeto en un momento determinado, dime las fuerzas que actúan sobre él, y las ecuaciones de Newton hacen el resto, prediciendo la trayectoria posterior del objeto. Ya sea que la luna sea arrastrada por la gravedad de la Tierra o una pelota de béisbol que acaba de golpear hacia el centro del campo, las observaciones han confirmado que estas predicciones son exactas.

Pero esta es la cuestión. Si usted tomó la física de la escuela secundaria, tal vez recuerde que cuando analizamos las trayectorias de los objetos macroscópicos generalmente, si bien en silencio, invocamos una gran cantidad de simplificaciones. En el caso de la Luna y la pelota de béisbol ignoramos su estructura interna e imaginamos que cada una es sólo una única partícula masiva. Es una aproximación aproximada. Incluso un grano de sal contiene cerca de un billón de billones de moléculas, y eso es, bueno, un grano de sal. Sin embargo, a medida que la luna orbita, generalmente no nos importa el movimiento brusco de una u otra molécula que habita en el polvoriento Mar de la Tranquilidad. Como la pelota de béisbol se eleva, no nos importa la vibración de una u otra molécula que reside en su núcleo de corcho. El movimiento general de la Luna o de la pelota de béisbol en su conjunto es todo lo que buscamos. Y para eso, aplicar las leyes de Newton a estos modelos simplificados hace el truco.[5]

Estos éxitos ponen de relieve el reto al que se enfrentan los físicos del siglo XIX preocupados por las máquinas de vapor. El vapor caliente que empuja contra el pistón del motor comprende un enorme número de moléculas de agua, tal vez un billón de trillones de

partículas. No podemos ignorar esta estructura interna como lo hacemos en nuestro análisis de la luna o la pelota de béisbol. Es el movimiento de estas mismas partículas, golpeando el pistón, rebotando en su superficie, golpeando las paredes del contenedor, volviendo a fluir hacia el pistón, lo que está en el corazón del funcionamiento del motor. El problema es que no hay manera de que nadie, en cualquier lugar, por muy inteligentes que sean y por muy formidables que sean las computadoras que utilicen, puedan calcular todas las trayectorias individuales seguidas por tan enorme colección de moléculas de agua.

¿Estamos atascados?

Podría pensarse así. Pero resulta que estamos salvados por un cambio de perspectiva. Las grandes colecciones a veces pueden producir sus propias simplificaciones poderosas. Seguramente es difícil, imposible en realidad, predecir exactamente cuándo será el próximo estornudo. Sin embargo, si ampliamos nuestra visión a la colección más grande de todos los humanos de la Tierra, *podemos predecir* que en el próximo segundo habrá aproximadamente ochenta mil estornudos en todo el mundo. [6] El punto es que al cambiar a una perspectiva estadística, la gran población de la Tierra se convierte en la clave, y no en el obstáculo, del poder de predicción. Los grandes grupos a menudo muestran regularidades estadísticas ausentes a nivel individual.

Un enfoque análogo para grandes grupos de átomos y moléculas fue promovido por James Clerk Maxwell, Rudolf Clausius, Ludwig Boltzmann y muchos de sus colegas. Ellos abogaron por desechar la consideración detallada de las trayectorias individuales en favor de las declaraciones estadísticas que describen el comportamiento promedio de las grandes colecciones de partículas. Demostraron que este enfoque no sólo hace que los cálculos sean matemáticamente trazables, sino que las propiedades físicas que puede cuantificar son las que más importan. La presión que empuja el pistón de una máquina de vapor, por ejemplo, apenas se ve afectada por el camino preciso que sigue esta o aquella molécula de agua individual. En cambio, la presión surge del movimiento promedio de los billones y billones de moléculas que chocan contra su superficie cada segundo. *Eso es* lo que importa. Y *eso es* lo que el enfoque estadístico permitió a los científicos calcular.

En nuestra era actual de encuestas políticas, genética de la población y grandes datos en general, el cambio a un marco estadístico podría no parecer radical. Nos hemos acostumbrado al poder de los conocimientos estadísticos extraídos del estudio de grandes grupos. Pero en el siglo XIX y a principios del XX, el razonamiento estadístico se alejó de la rígida precisión que había llegado a definir la física. Tenga en cuenta, también, que hasta los primeros años del siglo XX todavía había científicos muy respetados que cuestionaban la existencia de los átomos y las moléculas, la base misma de un enfoque estadístico.

A pesar de los detractores, no tomó mucho tiempo para que el razonamiento estadístico probara su valor. En 1905, el propio Einstein explicó cuantitativamente el movimiento tembloroso de los granos de polen suspendidos en un vaso de agua invocando el continuo bombardeo de las moléculas de H2O. Con ese éxito, había que ser un contrincante para dudar de la existencia de las moléculas. Es más, un creciente archivo de trabajos teóricos y experimentales reveló que las conclusiones basadas en los análisis estadísticos de grandes

colecciones de partículas, describiendo cómo rebotan alrededor de los contenedores y, por lo tanto, ejercen presión sobre esta superficie, o adquieren esa densidad, o se relajan ante esos datos de temperatura tan exquisitamente que simplemente no había lugar para cuestionar el poder explicativo del enfoque. Así nació la base estadística de los procesos térmicos.

Todo esto fue un gran triunfo y ha permitido a los físicos comprender no sólo las máquinas de vapor sino también una amplia gama de sistemas térmicos, desde la atmósfera de la Tierra, a la corona solar, hasta la vasta colección de partículas que pululan dentro de una estrella de neutrones. ¿Pero cómo se relaciona esto con la visión de Russell del futuro, su pronóstico de un universo que se arrastra hacia la muerte? Buena pregunta. Agárrate fuerte. Estamos llegando a eso. Pero todavía tenemos un par de pasos por delante. El siguiente es usar estos avances para arrojar luz sobre la cualidad quintaesencial del futuro: difiere profundamente del pasado.

De esto a aquello

La distinción entre el pasado y el futuro es a la vez básica y fundamental para la experiencia humana. Nacimos en el pasado. Moriremos en el futuro. En medio, somos testigos de innumerables acontecimientos que se desarrollan a través de una secuencia de eventos que, si se consideran en orden inverso, parecerían absurdos. Van Gogh pintó *Noche estrellada* pero no pudo levantar los colores arremolinados a través de pinceladas inversas, restaurando un lienzo en blanco. El *Titanic raspó* a lo largo de un iceberg y abrió su casco, pero no pudo invertir los motores, volver a su camino y deshacer el daño. Cada uno de nosotros crece y envejece, pero no podemos hacer retroceder las manecillas de nuestros relojes internos y recuperar nuestra juventud.

Siendo la irreversibilidad tan importante para la evolución de las cosas, se podría pensar que podríamos identificar fácilmente su origen matemático dentro de las leyes de la física. Seguramente, deberíamos ser capaces de señalar algo específico en las ecuaciones que asegure que aunque las cosas pueden transformarse de *esto* a *aquello, las matemáticas les prohíben transformarse* de *aquello* a *esto.* Pero durante cientos de años las ecuaciones que hemos desarrollado no nos han ofrecido nada de eso. En su lugar, a medida que las leyes de la física se han ido refinando continuamente, pasando por las manos de Newton (mecánica clásica), Maxwell (electromagnetismo), Einstein (física relativista), y las docenas de científicos responsables de la física cuántica, una característica ha permanecido estable: las leyes se han adherido firmemente a una completa insensibilidad a lo que los humanos llamamos futuro y a lo que llamamos pasado. Dado el estado del mundo en este momento, las ecuaciones matemáticas tratan el desarrollo hacia el futuro o el pasado exactamente de la misma manera. Mientras que esa distinción nos importa, profundamente, las leyes se encogen de hombros ante la diferencia, evaluándola como de ninguna consecuencia mayor que el reloj de un estadio marcando el tiempo transcurrido o el tiempo restante. Lo que significa que si las leyes permiten que ocurra una secuencia particular de eventos, entonces las leyes necesariamente permiten también la secuencia inversa. [7]

Como estudiante, cuando me enteré de esto, me pareció tímido o ridículo. En el mundo real no vemos buzos olímpicos saliendo de las piscinas con los pies por delante y aterrizando tranquilamente en los trampolines. No vemos fragmentos de vidrios de colores saltando del suelo y volviéndose a montar en una lámpara Tiffany. Los clips de las películas que se proyectan al revés son divertidos por la misma razón de que lo que vemos proyectado difiere tanto de cualquier cosa que experimentemos. Y sin embargo, de acuerdo con las matemáticas, los eventos representados en los clips de corridas inversas están totalmente de acuerdo con las leyes de la física.

¿Por qué entonces nuestra experiencia es tan desigual? ¿Por qué sólo vemos que los eventos se desarrollan en una orientación temporal y nunca al revés? Una parte clave de la respuesta se revela en la noción de *entropía,* un concepto que será esencial para nuestra comprensión del desarrollo cósmico.

Entropía: Una primera pasada

La entropía es uno de los conceptos más confusos de la física fundamental, hecho que no ha disminuido el apetito cultural por invocarla libremente para describir situaciones cotidianas que han evolucionado del orden al caos o, más simplemente, del bien al mal. Según el uso coloquial, esto está bien; a veces, también he invocado la entropía de esa manera. Pero como la concepción científica de la entropía guiará nuestro viaje, y también está en el corazón de la oscura visión de Russell del futuro, vamos a desentrañar su significado más preciso.

Empieza con una analogía. Imagine que agita vigorosamente una bolsa que contiene cien peniques y luego los tira en la mesa del comedor. Si descubrieras que los cien peniques son cabezas, seguramente te sorprenderías. ¿Pero por qué? Parece obvio, pero vale la pena pensarlo bien. La ausencia de una sola cola significa que cada una de las cien monedas, lanzadas al azar, chocando y empujando, debe golpear la mesa y aterrizar con la cabeza en alto. Todas ellas. Eso es difícil. Conseguir ese resultado único es una tarea difícil. En comparación, si consideramos incluso un resultado ligeramente diferente, digamos en el que tenemos una sola cola (y los otros 99 peniques siguen siendo todas cabezas), hay cien maneras diferentes en las que esto puede suceder: la cola solitaria podría ser la primera moneda, o podría ser la segunda moneda, o la tercera, y así sucesivamente hasta la centésima moneda. Conseguir 99 cabezas es por lo tanto cien veces más fácil, cien veces más probable, que conseguir todas las cabezas.

Sigamos adelante. Un pequeño cálculo revela que hay 4.950 maneras diferentes de obtener dos colas (primera y segunda monedas colas; primera y tercera colas; segunda y tercera colas; primera y cuarta colas; y así sucesivamente). Un poco más de cálculo y encontramos que hay 161.700 maneras diferentes de que tres de las monedas salgan cruz, casi 4 millones de maneras de tener cuatro colas; y alrededor de 75 millones de maneras de tener cinco colas. Los detalles de los números apenas importan; es la tendencia general a la que me dirijo. Cada cola adicional permite una colección mucho más grande de resultados que encajan en el billete. Fenomenalmente más grande. Los números llegan a 50 colas (y 50 cabezas), para las cuales hay alrededor de cien mil millones de billones de

combinaciones posibles (bueno, 100.891.344.545.564.193.334.812.497.256 combinaciones). [8] Obtener 50 cabezas y 50 colas es, por lo tanto, alrededor de cien mil millones de billones de veces más probable que obtener todas las cabezas.

Es por eso que conseguir todas las cabezas sería impactante.

Mi explicación se basa en el hecho de que la mayoría de nosotros intuitivamente analizamos la colección de centavos de la misma manera que Maxwell y Boltzmann abogaron por analizar un contenedor de vapor. Al igual que los científicos se negaron a analizar el vapor molécula por molécula, no solemos evaluar una colección aleatoria de centavos moneda por moneda. Apenas nos importa o nos damos cuenta si el 29º centavo es cara o el 71º es cruz. En su lugar, miramos la colección como un todo. Y la característica que nos llama la atención es el número de cabezas comparado con el número de colas: ¿Hay más cabezas que colas o más colas que cabezas? ¿El doble? ¿Tres veces más? ¿Aproximadamente cantidades iguales? Podemos detectar cambios significativos en la proporción de cara a cruz, pero los reordenamientos aleatorios que preservan la proporción -como voltear las monedas 23, 46 y 92 de cruz a cara y también voltear las monedas 17, 52 y 81 de cara a cruz- son virtualmente indistinguibles. Por consiguiente, dividí los posibles resultados en grupos, cada uno de los cuales contiene las configuraciones de monedas que parecen más o menos iguales, y enumeré la composición de cada grupo: Conté el número de resultados sin cruz, el número de resultados con 1 cola, el número de resultados con 2 colas, y así sucesivamente, hasta el número de resultados con 50 colas.

La clave es que estos grupos no tienen una composición igualitaria. Ni siquiera cerca. Esto hace evidente por qué te sorprendería que una sacudida al azar de los centavos no diera lugar a una cola (un grupo con precisamente 1 miembro), algo menos que una sacudida al azar diera lugar a una cola (un grupo con 100 miembros), un poco menos que dos colas (un grupo con 4.950 miembros), pero bostezarías si la sacudida diera lugar a una configuración que fuera mitad cara y mitad cola (un grupo con aproximadamente 100.000 millones de millones de miembros). Cuanto mayor sea la membresía de un grupo dado, más probable es que un resultado aleatorio pertenezca a ese grupo. El tamaño del grupo importa.

Si este material es nuevo para usted, puede que no se dé cuenta de que hemos ilustrado ahora el concepto esencial de la entropía. La entropía de una configuración dada de los peniques es el tamaño de su grupo, el número de configuraciones compañeras que se parecen bastante a la configuración dada. [9] Si hay muchas semejantes, la configuración dada tiene alta entropía. Si hay pocos semejantes, la configuración dada tiene baja entropía. En igualdad de condiciones, una sacudida aleatoria es más probable que pertenezca a un grupo con mayor entropía, ya que tales grupos tienen más miembros.

Esta formulación también se conecta con los usos coloquiales de la entropía a los que me referí al principio de esta sección. Intuitivamente, las configuraciones desordenadas (piense en un escritorio caótico apilado en lo alto con documentos, bolígrafos y clips dispersos) tienen una alta entropía porque una gran cantidad de reordenamientos de los constituyentes todos se ven más o menos iguales; reordene al azar una configuración desordenada y todavía se ve desordenada. Las configuraciones ordenadas (piense en un

escritorio prístino con todos los documentos, bolígrafos y clips de papel colocados ordenadamente en sus posiciones designadas) tienen baja entropía porque muy pocos reordenamientos de los constituyentes se ven iguales. Al igual que con los centavos, la alta entropía llama la atención porque los arreglos desordenados superan con creces a los ordenados.

Entropía: El Verdadero Trato

Los peniques son particularmente útiles porque ilustran el enfoque que los científicos desarrollaron para tratar la voluminosa colección de partículas que constituyen los sistemas físicos, ya sean moléculas de agua que revolotean de un lado a otro en una máquina de vapor caliente o moléculas de aire a la deriva por la habitación en la que se respira ahora. Al igual que con los centavos, ignoramos los detalles de las partículas individuales, ya sea que una molécula de agua o de aire en particular esté aquí o allá es de poca importancia, y en su lugar agrupamos las configuraciones de las partículas que se parecen bastante. En el caso de los peniques, el criterio de semejanza invocó la relación entre cara y cola porque típicamente somos indiferentes a la disposición de cualquier moneda en particular, y generalmente sólo tomamos nota del aspecto general de la configuración. Pero, ¿qué significa "parecerse bastante" para una gran colección de moléculas de gas?

Piensa en el aire que ahora llena tu habitación. Si eres como yo y el resto de nosotros, no podría importarte menos si esta molécula de oxígeno está revoloteando por la ventana o esa molécula de nitrógeno está rebotando en el suelo. Sólo te importa que cada vez que inhalas haya un volumen adecuado de aire para satisfacer tus necesidades. Bueno, hay un par de otras características que probablemente también te importen. Si la temperatura del aire fuera tan caliente que quemaras tus pulmones, serías infeliz. O si la presión del aire era tan alta (y no la habías igualado con el aire que ya estaba en las trompas de Eustaquio) que te reventarían los tímpanos, también estarías descontento. Su preocupación, entonces, es con el volumen del aire, la temperatura del aire y la presión del aire. De hecho, estas son las cualidades macroscópicas que los físicos de Maxwell y Boltzmann a través de la actualidad también se preocupan.

Por consiguiente, para una gran colección de moléculas en un recipiente, decimos que las diferentes configuraciones "parecen más o menos iguales" si llenan el mismo volumen, tienen la misma temperatura y ejercen la misma presión. Al igual que con los centavos, agrupamos todas las configuraciones parecidas de las moléculas y decimos que cada miembro del grupo da lugar al mismo *macroestado.* La entropía del macroestado es el número de semejantes. Suponiendo que no está encendiendo un calentador (afectando a la temperatura) o poniendo un divisor impermeable en la habitación (afectando al volumen), o bombeando oxígeno adicional (afectando a la presión), la configuración en constante evolución de las moléculas de aire que revolotean de un lado a otro en la habitación que está habitando ahora pertenecen todas al mismo grupo -todas parecen iguales- ya que todas producen las mismas características macroscópicas que usted está experimentando actualmente.

La organización de las partículas en grupos de semejantes proporciona un esquema extraordinariamente poderoso. Así como los centavos lanzados al azar tienen más probabilidades de pertenecer a un grupo de mayor pertenencia (con mayor entropía), también lo tienen las partículas que rebotan al azar. La realización es tan sencilla como sus implicaciones son de gran alcance: tanto si las partículas que rebotan están en una máquina de vapor, en su habitación o en cualquier otro lugar, al comprender las características típicas de las configuraciones más comunes (las que pertenecen a los grupos de mayor pertenencia), podemos hacer predicciones sobre las cualidades macroscópicas del sistema, las mismas que nos interesan. Estas son predicciones estadísticas, por supuesto, pero con una probabilidad fantásticamente alta de ser exactas. Y lo mejor es que logramos todo esto evitando la insuperable complejidad de analizar las trayectorias de un número absurdamente grande de partículas.

Por lo tanto, para llevar a cabo el programa necesitamos agudizar nuestra capacidad de identificar configuraciones de partículas comunes (alta entropía) frente a las raras (baja entropía). Es decir, dado el estado de un sistema físico, necesitamos determinar si hay muchas o pocas reordenaciones de los constituyentes que dejarían el sistema con un aspecto más o menos igual. Como estudio de caso, vamos a visitar su baño lleno de vapor justo después de haber tomado una larga ducha caliente. Para determinar la entropía del vapor, necesitamos contar el número de configuraciones de las moléculas -sus posibles posiciones y sus posibles velocidades- que tienen todas las mismas propiedades macroscópicas, es decir, tienen el mismo volumen, la misma temperatura y la misma presión. [10] Realizar el conteo matemático para una colección de moléculas de H2O es más difícil que el conteo análogo para una colección de centavos, pero es algo que la mayoría de los estudiantes de física aprenden a hacer en su segundo año. Más sencillo, y también más esclarecedor, es averiguar cómo el volumen, la temperatura y la presión afectan cualitativamente a la entropía.

Primero el volumen. Imagina que las moléculas de H2O que revolotean están fuertemente agrupadas en una pequeña esquina de tu baño, creando un denso nudo de vapor. En esta configuración, los posibles reordenamientos de las posiciones de las moléculas se reducirán drásticamente; a medida que mueva las moléculas de H2O, debe mantenerlas dentro de ese nudo o de lo contrario la configuración modificada *se verá* diferente. En comparación, cuando el vapor se reparte uniformemente por todo el cuarto de baño, el juego de sillas musicales moleculares está mucho menos limitado. Puedes intercambiar las posiciones de las moléculas cerca del tocador con las que flotan junto a la lámpara, las que están cerca de la cortina de la ducha con las que se encuentran junto a la ventana, y aún así, en general, el vapor tendrá el mismo aspecto. Observe también que cuanto más grande sea su cuarto de baño, mayor será el número de lugares que tiene para rociar alrededor de las moléculas, lo que también aumenta el número de reordenamientos disponibles. La conclusión, entonces, es que las configuraciones de moléculas más pequeñas y estrechamente agrupadas tienen menor entropía, mientras que las configuraciones más grandes y uniformemente esparcidas tienen mayor entropía.

La temperatura es la siguiente. A nivel de las moléculas, ¿qué entendemos por temperatura? La respuesta es bien conocida. La temperatura es la velocidad media de un

conjunto de moléculas. [11] Algo está frío cuando la velocidad media de sus moléculas es baja y está caliente cuando la velocidad media es alta. Así que determinar cómo la temperatura afecta a la entropía equivale a determinar cómo la velocidad media de las moléculas afecta a la entropía. Y como hemos encontrado con las posiciones moleculares, una evaluación cualitativa está muy cerca. Si la temperatura del vapor es baja, las reorganizaciones permitidas de las velocidades moleculares serán comparativamente pocas en número: para mantener la temperatura fija -y por lo tanto asegurar que las configuraciones se vean prácticamente iguales- hay que compensar cualquier aumento de las velocidades de algunas moléculas con una disminución adecuada de las velocidades de otras. Pero la carga de tener una temperatura baja (baja velocidad molecular media) es que no tienes mucho espacio para disminuir las velocidades antes de tocar fondo, cero. El rango disponible de posibles velocidades moleculares es por lo tanto estrecho, y por lo tanto su libertad para reordenar las velocidades es limitada. En comparación, si la temperatura es alta, tu juego de sillas musicales se acelera una vez más: con un promedio más alto, el rango de velocidades moleculares -algunas más grandes que el promedio y otras más pequeñas- es mucho más amplio, proporcionando una mayor latitud para mezclar las velocidades mientras se preserva el promedio. Más reordenamientos de las velocidades moleculares que parecen iguales significa que una temperatura más alta generalmente implica una mayor entropía.

Finalmente, la presión. La presión del vapor sobre la piel o sobre las paredes del baño se debe al impacto de las moléculas de H2O que chocan contra estas superficies: cada impacto molecular ejerce un pequeño empuje, por lo que cuanto mayor sea el número de moléculas, mayor será la presión. Para una temperatura y un volumen dados, la presión está así determinada por el número total de moléculas de vapor en su baño, una cantidad cuyas consecuencias para la entropía pueden ser calculadas con la mayor facilidad. Menos moléculas de H2O en su baño (usted tomó una ducha más corta) significa que son posibles menos reordenamientos, y por lo tanto la entropía es menor; más moléculas de H2O (usted tomó una ducha más larga) significa que son posibles más reordenamientos, y por lo tanto la entropía es mayor.

Para resumir: Tener menos moléculas, o tener una temperatura más baja, o llenar un volumen más pequeño resulta en una menor entropía. Tener más moléculas, o tener una temperatura más alta, o llenar un volumen mayor resulta en una mayor entropía.

De este breve estudio, permítanme subrayar una forma de pensar sobre la entropía, que carece de precisión pero que proporciona una regla útil. Usted debe esperar encontrar estados de alta entropía. Debido a que tales estados pueden ser realizados por una gran cantidad de diferentes arreglos de las partículas constituyentes, son típicos, peatonales, fácilmente configurables, una moneda de diez centavos por docena. Por el contrario, si usted encuentra un estado de baja entropía debe llamar su atención. La baja entropía significa que hay muchas menos formas en que el macroestado dado puede ser realizado por sus ingredientes microscópicos, y por lo tanto tales configuraciones son difíciles de conseguir, son inusuales, están cuidadosamente dispuestas, son raras. Salga de una larga ducha caliente y encuentre el vapor uniformemente repartido por todo el baño: alta entropía y totalmente poco sorprendente. Salir de una larga ducha caliente y encontrar el vapor

agrupado en un pequeño cubo perfecto que flota frente al espejo: baja entropía y extraordinariamente inusual. Tan inusual, de hecho, que si te encuentras con una configuración así, deberías ser extremadamente escéptico de la explicación de que simplemente te has encontrado con una de esas cosas improbables que a veces suceden. Esa *podría* ser la explicación. Pero apostaría mi vida a que no lo es. Así como sospecharía que hay una razón más allá de la mera casualidad de que cien peniques en la mesa del comedor son todas cabezas (como alguien juiciosamente lanzado sobre cada moneda que cayó en cola), debería buscar una explicación más allá de la mera casualidad para cualquier configuración de baja entropía que encuentre.

Este razonamiento se aplica incluso a lo aparentemente mundano, como encontrarse con un huevo o un hormiguero o una taza. La naturaleza ordenada, artesanal y de baja entropía de estas configuraciones requiere una explicación. Que el movimiento aleatorio de las partículas correctas podría fusionarse en un huevo, un hormiguero o una taza, es concebible, pero inverosímil. En cambio, estamos motivados para encontrar explicaciones más convincentes, y por supuesto no tenemos mucho que buscar: el huevo, el hormiguero y la taza surgen cada uno de formas particulares de vida que arreglan la configuración, por lo demás aleatoria, de las partículas en el ambiente para producir estructuras ordenadas. Cómo la vida es capaz de producir tan exquisito orden es un tema que abordaremos en capítulos posteriores. Por ahora, la lección es simplemente que las configuraciones de baja entropía deben ser vistas como un diagnóstico, una pista de que las poderosas influencias organizadoras pueden ser responsables del orden que hemos encontrado.

A finales del siglo XIX, armado con estas ideas, muchas de las suyas propias, el físico austriaco Ludwig Boltzmann creyó que podía abordar la cuestión que lanzó esta sección de nuestra discusión: ¿Qué distingue el futuro del pasado? Su respuesta se basaba en una cualidad de la entropía articulada por la segunda ley de la termodinámica.

Leyes de la Termodinámica

Mientras que la entropía y la segunda ley gozan de muchas referencias culturales, los asentimientos públicos a la primera ley de la termodinámica son menos comunes. Sin embargo, para comprender plenamente la segunda ley es bueno comprender primero la primera ley. Resulta que la primera ley también es ampliamente conocida, pero bajo un alias. Es la ley de la conservación de la energía. Cualquier energía que tengas al principio de un proceso es la misma energía que tendrás al final del proceso. Debes ser meticuloso en tu contabilidad de la energía, incluyendo todas las formas en las que un alijo inicial de energía puede haberse transformado, como la energía cinética (energía de movimiento), o la energía potencial (energía almacenada, como en un manantial estirado), o la radiación (energía transportada por campos, como los campos electromagnéticos o gravitacionales), o el calor (el movimiento tembloroso aleatorio de moléculas y átomos). Pero si se sigue con cuidado, la primera ley de la termodinámica asegura que el balance de energía se equilibrará.[12]

La segunda ley de la termodinámica se centra en la entropía. A diferencia de la primera ley, la segunda no es una ley de conservación. Es una ley de crecimiento. La segunda ley

declara que con el tiempo hay una tendencia abrumadora de la entropía a aumentar. En términos coloquiales, las configuraciones especiales tienden a evolucionar hacia las ordinarias (su camisa cuidadosamente planchada se arruga y se arruga) o el orden tiende a descender hacia el desorden (su garaje organizado degenera en un desorden desordenado de herramientas, cajas de almacenamiento y equipo deportivo). Mientras que esta representación proporciona una fina imagen intuitiva, la formulación estadística de Boltzmann de la entropía nos permite describir la segunda ley con precisión y, lo que es igual de importante, obtener una clara comprensión de por qué es verdad.

Todo se reduce a un juego de números. Considere de nuevo los centavos. Si se organizan cuidadosamente los peniques de manera que sean todos cara, una configuración de baja entropía, y luego los somete a un poco de sacudidas y empujones, se espera obtener al menos unas cuantas colas, una configuración de mayor entropía. Si se agitan más, es concebible que se vuelva a todas las cabezas, pero eso requeriría que el empujón sea el correcto, para estar tan perfectamente en sintonía que sólo devuelva las pocas monedas que resultaron ser colas. Eso es extraordinariamente improbable. Es fantásticamente más probable que el empujoncito en lugar de eso arroje una colección aleatoria de los centavos. Algunas de las pocas monedas que eran cruz podrían volver a cara, pero de las monedas que eran cara, muchas más se convertirán en cruz. Así que la lógica directa, sin matemáticas extravagantes ni ideas demasiado abstractas, revela que si empiezas con todas las cabezas, las sacudidas aleatorias provocarán un aumento en el número de colas. Un aumento, es decir, de la entropía.

La progresión hacia un mayor número de colas continuará hasta que lleguemos a una división de aproximadamente 50-50 cabezas-colas. En ese punto, el salto tenderá a voltear tantas cabezas a colas como colas a cabezas, y así los peniques pasarán la mayor parte de su tiempo migrando entre los miembros de los grupos más poblados y de mayor entropía.

Lo que es cierto para los centavos es cierto más generalmente. Hornee el pan y puede estar seguro de que el aroma pronto llenará las habitaciones lejos de la cocina. Al principio, las moléculas liberadas al hornear el pan se agrupan cerca del horno. Pero esas moléculas se dispersarán gradualmente. La razón, similar a nuestra explicación con los centavos, es que hay muchas más maneras de que las moléculas de aroma se dispersen en comparación con las maneras de agruparse. Por lo tanto, es mucho más probable que a través de los choques aleatorios las moléculas salgan hacia afuera en lugar de agruparse hacia adentro. La configuración de baja entropía de las moléculas agrupadas cerca del horno evoluciona naturalmente hacia el estado de mayor entropía en el que se propagan por toda la casa.[13]

Diciéndolo de manera más general, si un sistema físico no está ya en el estado de mayor entropía disponible, es abrumadoramente probable que evolucione hacia él. La explicación, bien ilustrada por el aroma del pan, descansa en el razonamiento más básico: debido a que el número de configuraciones con más entropía es enormemente mayor que las que tienen menos entropía (por la propia definición de entropía), las probabilidades son enormemente mayores de que el empujón aleatorio -el implacable choque y vibración de átomos y moléculas- conduzca el sistema hacia una entropía más alta, no más baja. La progresión continuará hasta que alcancemos una configuración con la mayor entropía disponible. Desde ese punto en adelante, el choque tenderá a impulsar a los componentes a migrar entre el (típicamente) gigantesco número de configuraciones de los estados de mayor entropía.[14]

Esa es la segunda ley de la termodinámica. Y es por eso que es verdad.

Energía y Entropía

La discusión podría llevar a pensar que la primera y la segunda ley son completamente distintas. Después de todo, una se centra en la energía y su conservación, la otra en la entropía y su crecimiento. Pero hay una profunda conexión entre ellas, destacando un hecho implícito en la segunda ley al que volveremos repetidamente: toda la energía no se crea igual.

Considere, como ejemplo, un cartucho de dinamita. Debido a que toda la energía almacenada en la dinamita está contenida en un paquete químico apretado, compacto y ordenado, la energía es fácil de aprovechar. Coloca la dinamita donde quieras que se deposite su energía y enciende la mecha. Eso es todo. Después de la explosión, toda la energía de la dinamita sigue existiendo. Esa es la primera ley en acción. Pero debido a que la energía de la dinamita se ha transformado en el movimiento rápido y caótico de las partículas ampliamente dispersas, aprovechar la energía es ahora extremadamente difícil. Así que, aunque la cantidad total de energía no cambia, el carácter de la energía sí lo hace.

Antes de la explosión, decimos que la energía de la dinamita es de alta calidad: es concentrada y de fácil acceso. Después de la explosión, decimos que la energía es de baja calidad: está dispersa y es difícil de utilizar. Y como la dinamita que explota cumple plenamente la segunda ley, pasando del orden al desorden -de baja entropía a alta entropía- asociamos la baja entropía con la energía de alta calidad y la alta entropía con la energía de baja calidad. Sí, ya lo sé. Hay muchos altibajos que controlar. Pero la conclusión es concisa: mientras que la primera ley de la termodinámica declara que la cantidad de energía

se conserva a lo largo del tiempo, la segunda ley declara que la calidad de esa energía se deteriora con el tiempo.

¿Por qué entonces el futuro es diferente del pasado? La respuesta, evidente a partir de lo que hemos desarrollado ahora, es que la energía que alimenta el futuro es de menor calidad que la que alimenta el pasado. El futuro tiene una mayor entropía que el pasado.

O al menos eso es lo que Boltzmann propuso.

Boltzmann y el Big Bang

Boltzmann seguramente estaba en algo. Pero hay una sutil aclaración a la segunda ley cuyas implicaciones, a decir verdad, le tomó algún tiempo incluso a Boltzmann para apreciarlas plenamente.

La segunda ley no es una ley en el sentido tradicional. La segunda ley *no* impide absolutamente que la entropía disminuya. Sólo declara que tal disminución es improbable. Para los centavos, hemos cuantificado esto. Comparado con la única configuración con todas las cabezas, es cien mil millones de billones de billones de veces más probable que la sacudida aleatoria produzca una configuración con 50 cabezas y 50 colas. Sacudir esa configuración de alta entropía de nuevo, y obtener una configuración de menor entropía como todas las cabezas no está prohibido, pero debido a las probabilidades altamente sesgadas, en la práctica no sucede.

Para un sistema físico cotidiano hecho de mucho más de un centenar de componentes, las probabilidades de que la entropía disminuya se vuelven aún más desalentadoras. Al hornearse el pan, libera miles de millones de moléculas. Las configuraciones en las que esas moléculas se esparcen por toda la casa son espectacularmente más numerosas que aquellas en las que colectivamente fluyen de vuelta al horno. A través de sus golpes y choques aleatorios, las moléculas *pueden volver sobre* sus pasos, encontrar el camino de vuelta al pan, deshacer completamente el proceso de cocción, y dejarte con un montón de masa cruda fría. Pero las probabilidades de que eso suceda son más cercanas a cero que la probabilidad de salpicar pintura en un lienzo y replicar la *Mona Lisa.* Aún así, el punto es que si un proceso de reversión de entropía como este ocurriera, no contravendría las leyes de la física. Aunque es espectacularmente improbable, las leyes de la física permiten que la entropía disminuya.

No me malinterprete. No lo menciono para sugerir que algún día podamos cocinar el pan o ver un coche desguazado o un documento quemado. En su lugar, estoy haciendo hincapié en un importante punto de principios. Ya expliqué antes que las leyes de la física ponen el futuro y el pasado en igualdad de condiciones. Así, las leyes aseguran que los procesos físicos que se desarrollan en una secuencia temporal pueden desarrollarse al revés. Y dado que esas mismas leyes lo gobiernan todo, incluyendo los procesos físicos responsables de cómo la entropía cambia con el tiempo, sería realmente curioso, erróneo en realidad, encontrar que esas leyes sólo permiten que la entropía aumente. No lo hacen. Todos los procesos de aumento de la entropía que ha experimentado día tras día durante toda su vida -desde lo mundano de un cristal roto hasta lo profundo del envejecimiento

corporal- pueden ocurrir a la inversa. La entropía puede disminuir. Es ridículamente improbable.

Entonces, ¿dónde deja esto nuestra búsqueda para explicar por qué el futuro es diferente del pasado? Bueno, dada una configuración actual de menos de la máxima entropía, la segunda ley muestra que el futuro es abrumadoramente probable que sea diferente porque la entropía es abrumadoramente probable que aumente. Las configuraciones de materia que tienen menos de la máxima entropía posible se muerden la lengua para proceder a una mayor entropía. Y con esa observación, algunos explorando la diferencia entre el pasado y el futuro descansan tranquilos, contando con que su trabajo está hecho.

Pero el trabajo no está hecho. Igual de importante, necesitamos explicar cómo es que nos encontramos hoy en un estado tan especial, improbable y sorprendente de menos de la máxima entropía, un universo repleto de estructuras ordenadas desde planetas y estrellas hasta pavos reales y personas. Si no fuera así, si la configuración de hoy fuera el esperado, ordinario y no sorprendente estado de máxima entropía, entonces con grandes probabilidades el universo seguiría habitando en tal estado, dando lugar a un futuro no diferente del pasado. Como una bolsa de centavos que se abría paso a través del enorme número de configuraciones con aproximadamente 50 cabezas y 50 colas, el universo serpentearía implacablemente a través del enorme paisaje de sus configuraciones de máxima entropía: partículas ampliamente dispersas que fluían de un lado a otro del espacio, una versión cósmica de su baño uniformemente lleno de vapor. [15] El estado actual de entropía menor que la máxima es, por suerte para nosotros, mucho más interesante. Proporciona la oportunidad para que las partículas se unan en estructuras y para que ocurra un cambio macroscópico. Y así nos vemos obligados a preguntarnos: ¿Cómo llegó a existir el estado actual de entropía inferior a la máxima?

Cumpliendo con la segunda ley, concluimos que el estado de hoy deriva del estado de entropía aún más bajo de ayer. Y ese estado, prevemos, se deriva del estado de entropía aún más baja del día anterior al de ayer, y así sucesivamente, dando lugar a un rastro de entropía cada vez menor que nos lleva cada vez más atrás en el tiempo hasta que finalmente llegamos al big bang. Un punto de partida de una entropía muy ordenada y extremadamente baja en el Big Bang es la razón por la que el universo de hoy no está al máximo de su capacidad entrópica, permitiendo un futuro lleno de acontecimientos que difiere del pasado.

¿Podemos ir más allá y explicar por qué el comienzo del universo fue tan ordenado? Volveremos a esta pregunta en el próximo capítulo, donde exploraremos la teoría cosmológica. Por ahora observamos que nuestra supervivencia requiere orden, desde nuestra organización molecular interna que soporta una gran cantidad de funciones de mantenimiento de la vida, hasta las fuentes de alimentos que nos proporcionan energía de alta calidad, y las herramientas y los hábitats elaborados que son esenciales para nuestra existencia continua. Sin un entorno lleno de estructuras ordenadas de baja entropía, los humanos no estaríamos aquí para notarlo.

El calor y la entropía

Comencé este capítulo con Bertrand Russell lamentando un universo sujeto a un declive implacable. Con la declaración de la segunda ley de la entropía creciente, hemos podido vislumbrar lo que inspiró su oscura profecía. Piense en la entropía creciente como un desorden creciente y tiene la esencia de ello. Pero para apreciar plenamente los futuros desafíos que enfrentarán la vida, la mente y la materia -un tema que exploraremos ampliamente en los capítulos siguientes- necesitamos establecer un vínculo entre la descripción moderna de la segunda ley de la termodinámica, tal como la he expuesto, y la formulación original desarrollada a mediados del siglo XIX. En esa versión anterior, la segunda ley codificaba lo que era obvio para cualquiera que trabajara con máquinas de vapor: el proceso de quemar combustible para hacer funcionar una máquina siempre produce calor y degradación de residuos. Sin embargo, como la versión anterior no mencionaba el conteo de configuraciones de partículas y no hacía uso del razonamiento probabilístico, podría parecer un mundo alejado de la declaración estadística de crecimiento entrópico que hemos estado desarrollando. Pero hay una profunda y directa conexión entre las dos formulaciones, una que revela por qué la conversión de la energía de alta calidad de la máquina de vapor en calor de baja calidad es ilustrativa de una degradación ubicua que tiene lugar en todo el cosmos.

Le explicaré el vínculo en dos pasos. Primero, veamos la relación entre la entropía y el calor. Luego, en la siguiente sección, uniremos el calor y la declaración estadística de la segunda ley.

Agarra el mango caliente de una sartén y sentirás como si el calor fluyera hacia tu mano. ¿Pero algo fluye realmente? Hace mucho tiempo, los científicos pensaron que la respuesta era sí. Imaginaron una sustancia parecida a un fluido, llamada "calórica", que fluiría de lugares más calientes a otros más fríos, como un río fluye de arriba a abajo. Con el tiempo, la comprensión más refinada de los ingredientes de la materia proporcionó una descripción diferente. Cuando se agarra el mango de la sartén, sus moléculas de movimiento más rápido chocan con las moléculas de movimiento más lento de la mano, haciendo que, en promedio, la velocidad de las que están en la mano suba y las del mango baje. Sientes el aumento de la velocidad de las moléculas en tu mano como calor; la temperatura de tu mano ha aumentado. En consecuencia, la menor velocidad de las moléculas en el mango significa que su temperatura ha disminuido. Lo que fluye, entonces, no es una sustancia. Las moléculas del mango se quedan en el mango, y las de la mano se quedan en la mano. En cambio, al igual que la información fluye de una persona a otra en un juego de teléfono, la agitación molecular fluye de las moléculas del mango a las de tu mano cuando la agarras. Y así, mientras que la materia en sí misma no fluye del mango a la mano, una cualidad de la materia, la velocidad molecular media, sí lo hace. Eso es lo que queremos decir con el flujo de calor.

La misma descripción se aplica a la entropía. A medida que la temperatura de la mano aumenta, sus moléculas rebotan más rápidamente, el rango de sus posibles velocidades se amplía, incrementando el número de configuraciones alcanzables que se ven más o menos igual, y así la entropía de la mano también aumenta. En consecuencia, a medida que la

temperatura del mango disminuye, sus moléculas se mueven más lentamente, el rango de sus posibles velocidades se estrecha, disminuyendo el número de configuraciones alcanzables que se parecen bastante, y así la entropía del mango disminuye.

Vaya. ¿La entropía *disminuye*?

Sí. Pero esto no tiene nada que ver con raras casualidades estadísticas como tirar una bolsa de centavos y conseguir todas las cabezas, como se describe en la sección anterior. La entropía del mango caliente disminuirá cada vez que lo agarres. El simple pero vital punto que ilustra el salteador es que el dictado de la segunda ley de aumento de entropía se refiere a la entropía *total de* un sistema físico completo, que necesariamente incluye todo con lo que el sistema interactúa. Dado que tu mano interactúa con el mango de la sartén, no puedes aplicar la segunda ley al mango por sí sola. Debes incluir tanto el asa como tu mano (y, para ser más precisos, toda la sartén, la estufa, el aire circundante, etc.). Y una contabilidad cuidadosa muestra que el aumento de la entropía de la mano supera la disminución de la entropía del mango, asegurando que la entropía total efectivamente suba.

Así que, al igual que con el calor, hay un sentido en el que la entropía puede fluir. En el caso de la sartén, fluye desde el mango hasta la mano. El mango se vuelve un poco más ordenado y tu mano se vuelve un poco menos ordenada. Una vez más, el flujo no es en forma de una sustancia tangible que inicialmente estaba en el mango y ahora se ha movido a su mano. Más bien, el flujo de entropía denota una interacción entre las moléculas del mango y las de la mano que afecta a las propiedades de cada una. En este caso, cambia sus velocidades medias -sus respectivas temperaturas- y eso, a su vez, afecta a la entropía que cada una contiene.

Como la descripción lo pone de manifiesto, el flujo de calor y el flujo de entropía están íntimamente conectados. Absorber el calor es absorber la energía que es transportada por el movimiento molecular aleatorio. Esa energía, a su vez, impulsa a las moléculas receptoras a moverse más rápidamente o a extenderse más ampliamente, contribuyendo así a un aumento de la entropía. La conclusión, entonces, es que para desplazar la entropía de aquí a allá, el calor necesita fluir de aquí a allá. Y cuando el calor fluye de aquí a allá, la entropía se desplaza de aquí a allá. En resumen, la entropía se monta en la ola de calor que fluye.

Con esta comprensión de la interrelación entre el calor y la entropía, volvamos ahora a la segunda ley.

El calor y la segunda ley de la termodinámica

Explicar por qué experimentamos eventos que se despliegan en una dirección pero no al revés nos llevó a Boltzmann y a su versión estadística de la segunda ley: la entropía es abrumadoramente probable que aumente hacia el futuro, lo que hace que las secuencias de marcha atrás (en las que la entropía disminuiría) sean fantásticamente improbables. ¿Cómo se relaciona esto con la anterior formulación de la segunda ley, inspirada en la máquina de vapor, que fue redactada en términos de la implacable producción de calor residual por parte de los sistemas físicos?

La conexión es que los dos puntos de partida, la reversibilidad y las máquinas de vapor, están estrechamente vinculados. La razón es que la máquina de vapor depende de un proceso cíclico: un pistón es empujado hacia adelante por el vapor en expansión y luego se reajusta a su posición original, donde espera el siguiente empuje. El vapor también vuelve a su volumen, temperatura y presión originales, al igual que todas las partes vitales del motor, preparando al motor para calentarse y volver a empujar el pistón. Aunque nada de esto requiere el ridículo e improbable despliegue en el que cada molécula encuentra su camino de vuelta al mismo punto o adquiere exactamente la misma velocidad que tenía al comienzo del ciclo anterior, sí requiere que el arreglo global -el macroestado del motor- vuelva a la misma forma para iniciar cada ciclo subsiguiente.

¿Qué implica eso para la entropía? Bueno, ya que la entropía es un recuento de las configuraciones microscópicas que se presentan como el mismo macroestado, si el macroestado de la máquina de vapor se reajusta al comienzo de cada nuevo ciclo, entonces su entropía también debe ser reajustada. Lo que significa que la entropía que la máquina de vapor adquiere durante un ciclo determinado (ya que absorbe el calor del combustible en combustión, ya que genera calor adicional por fricción de sus partes móviles, y así sucesivamente) debe ser expulsada al medio ambiente para el momento en que el ciclo concluye. ¿Cómo logra esto la máquina de vapor? Bueno, hemos visto que para transferir la entropía hay que transferir el calor. Por lo tanto, para que la máquina de vapor se reinicie para el siguiente ciclo, *debe liberar calor al medio ambiente.* Esa es la declaración histórica de la segunda ley de la termodinámica, la inevitable expulsión del calor residual al medio ambiente - la misma degradación que tanto pesó sobre Bertrand Russell - ahora derivada de la versión estadística de la segunda ley.[16]

Este es el destino al que me dirigía, así que no dude en pasar a la siguiente sección. Pero si tiene paciencia, hay un detalle que sería negligente no mencionar. Se preguntarán, si la máquina de vapor absorbe el calor del combustible que se quema (absorbiendo así la entropía) sólo para liberar calor al medio ambiente (liberando así la entropía), ¿cómo es que tiene alguna energía restante para realizar tareas útiles, como alimentar una locomotora? La respuesta es que la máquina de vapor libera menos calor del que absorbe y aún así es capaz de purgar completamente la entropía que ha acumulado. Así es como funciona:

La máquina de vapor absorbe el calor y la entropía del combustible que se quema y libera calor y entropía al ambiente más fresco. La diferencia de temperatura entre el combustible y el medio ambiente es lo que es vital. Para ver por qué, imagina encender dos calentadores idénticos, uno en una habitación que es frígida y el otro en una habitación que es caliente. En el cuarto frígido, las moléculas frías del aire son sacudidas por el calentador, causando que se muevan más rápido y se dispersen ampliamente, y así su entropía aumenta significativamente. En la habitación caliente, las moléculas de aire ya se están moviendo rápidamente y revoloteando ampliamente, por lo que el calentador espacial sólo aumenta ligeramente su entropía. (Es como subir el ritmo en una salvaje fiesta de Año Nuevo y apenas notar que los juerguistas bailan un toque más rápido, pero sube el ritmo en el Monasterio de Thiksay, incitando a los monjes a romper su práctica meditativa y empezar a hacer krumping, y fácilmente se vería el cambio). Así que aunque los dos calentadores espaciales son idénticos, la entropía que transfieren a su entorno es diferente: mientras que

cada uno genera la misma cantidad de calor, el calentador espacial del entorno más fresco transfiere más entropía. Un entorno más fresco amplifica así una cantidad dada de calor recibido en un mayor aumento entrópico. Con esa comprensión, vemos que la máquina de vapor puede descargar toda la entropía que adquiere del combustible más caliente expulsando sólo una parte de ese calor al entorno más frío. El calor restante está entonces disponible para impulsar al vapor a expandirse, empujando el pistón y realizando un trabajo útil.

Esa es la explicación, pero no dejes que los detalles nublen la conclusión mayor: con el tiempo, los sistemas físicos evolucionarán, con fantásticas probabilidades, de configuraciones de baja entropía a configuraciones de alta entropía. Si un sistema, como una máquina de vapor, busca mantener su integridad estructural, debe evitar el impulso natural hacia una mayor entropía, transfiriendo la entropía que construye a su entorno. Para ello, el motor debe liberar el calor residual al medio ambiente.

El Entropic Two-Step

Si se piensa cuidadosamente en los pasos que hemos seguido, se verá que aunque la máquina de vapor ha sido salpicada en todo, nuestras conclusiones trascienden este punto de partida del siglo XVIII. La esencia de nuestro análisis es una estrecha contabilidad de la entropía, y esa contabilidad puede llevarse a cabo en cualquier contexto. Esta es una realización clave, porque el desplazamiento de la entropía de la máquina de vapor a su entorno a través de la liberación de calor no es más que una versión de un proceso totalmente ubicuo que encontraremos a medida que sigamos el desarrollo del cosmos. Lo llamo el doble *paso entrópico,* con lo que me refiero a cualquier proceso en el que la entropía de un sistema disminuye porque desplaza un aumento más que compensatorio de la entropía al medio ambiente. El dos-paso asegura que aunque la entropía pueda disminuir aquí, aumentará allí, asegurando el aumento entrópico neto que esperamos basado en la segunda ley.

El doble paso entrópico está en el corazón de cómo un universo que se dirige hacia un desorden cada vez mayor puede, sin embargo, producir y apoyar estructuras ordenadas como estrellas, planetas y personas. Un tema que encontraremos repetidamente es que cuando la energía fluye a través de un sistema - como la energía de la quema de carbón que fluye a través del vapor, impulsando el trabajo, y luego saliendo al medio ambiente circundante - se lleva la entropía y puede así sostener o incluso producir orden a su paso.

Es esta danza entrópica la que coreografiará el surgimiento de la vida y la mente, así como casi todo lo que las mentes consideran importante.

Eres una máquina de vapor

Dada la importancia de restablecer la entropía cada vez que una máquina de vapor atraviesa un ciclo, cabe preguntarse qué ocurriría si el restablecimiento de la entropía fallara. Esto equivale a que la máquina de vapor no expulsa el calor de desecho adecuado, por lo que con cada ciclo la máquina se calentaría más hasta que se sobrecalentara y se averiara. Si

una máquina de vapor sufriera tal destino, podría resultar inconveniente pero, suponiendo que no hubiera lesiones, probablemente no llevaría a nadie a una crisis existencial. Sin embargo, la misma física es fundamental para saber si la vida y la mente pueden persistir indefinidamente en el futuro. La razón es que lo que vale para la máquina de vapor vale para ti.

Es probable que no se considere una máquina de vapor o tal vez incluso un artilugio físico. Yo también, sólo raramente uso esos términos para describirme a mí mismo. Pero piénselo: su vida implica procesos no menos cíclicos que los de la máquina de vapor. Día tras día, tu cuerpo quema los alimentos que comes y el aire que respiras para proporcionar energía para tu funcionamiento interno y tus actividades externas. Incluso el mismo acto de pensar, el movimiento molecular que tiene lugar en tu cerebro, es impulsado por estos procesos de conversión de energía. Y así, al igual que la máquina de vapor, no podrías sobrevivir sin reajustar tu entropía purgando el exceso de calor residual al medio ambiente. De hecho, eso es lo que haces. Eso es lo que todos hacemos. Todo el tiempo. Es por eso que, por ejemplo, las gafas de infrarrojos del ejército diseñadas para "ver" el calor que todos expulsamos continuamente hacen un buen trabajo al ayudar a los soldados a detectar a los combatientes enemigos por la noche.

Ahora podemos apreciar más plenamente la mentalidad de Russell al imaginar el futuro lejano. Todos estamos librando una batalla implacable para resistir la persistente acumulación de desechos, el imparable aumento de la entropía. Para que sobrevivamos, el medio ambiente debe absorber y llevarse todos los residuos, toda la entropía que generamos. Lo que plantea la pregunta, ¿proporciona el medio ambiente -con lo que ahora nos referimos al universo observable- un pozo sin fondo para absorber tales residuos? ¿Puede la vida bailar el doble paso entrópico indefinidamente? ¿O podría llegar un momento en el que el universo esté, en efecto, relleno y por lo tanto sea incapaz de absorber el calor de desecho generado por las mismas actividades que nos definen, poniendo fin a la vida y a la mente? En la lacrimógena frase de Russell, ¿es cierto que "todas las labores de las épocas, toda la devoción, toda la inspiración, todo el brillo del mediodía del genio humano, están destinadas a la extinción en la vasta muerte del sistema solar, y que todo el templo del logro del Hombre debe inevitablemente ser enterrado bajo los escombros de un universo en ruinas"?[17]

Estas son algunas de las preguntas centrales que exploraremos en los próximos capítulos. Pero nos hemos adelantado un poco a nosotros mismos. Antes de discutir la vida y la mente, entendamos cómo la entropía y la segunda ley juegan en la formación de los ambientes necesarios para que la vida y la mente se afiancen.

Para eso, volvemos al Big Bang.

3

ORÍGENES Y ENTROPÍA

De la creación a la estructura

Cuando las matemáticas permiten a los científicos mirar hacia atrás a una fracción de segundo de lo que bien podría haber sido el comienzo del universo, la proximidad al terreno tradicionalmente religioso sugiere a algunos que hay una profunda alianza o una profunda conexión o un profundo conflicto que se esfuerza por ser revelado. Es por eso que recibo preguntas sobre mis puntos de vista sobre un creador casi tan frecuentemente como aquellos que preguntan sobre la ciencia. De hecho, las preguntas a menudo se extienden a ambos lados. Tendremos mucho tiempo para considerar tales asuntos en capítulos posteriores, pero aquí exploraremos un punto de contacto, planteado al final del capítulo anterior, esencial para nuestra historia más amplia: Si la segunda ley de la termodinámica agobia al universo con un implacable aumento del desorden, ¿cómo puede la naturaleza producir tan fácilmente estructuras exquisitamente configuradas y altamente ordenadas, desde átomos y moléculas, hasta estrellas y galaxias, hasta la vida y la mente? Si el universo comenzó con un estallido explosivo, ¿cómo pudo ese ardiente despliegue haber dado lugar a toda la organización -desde los brazos arremolinados de la Vía Láctea, a los impresionantes paisajes de la Tierra, a las intrincadas conexiones y pliegues ondulados del cerebro humano, al arte, la música, la poesía, la literatura y la ciencia que tales cerebros producen?

Una respuesta, en la que se ha confiado a través de los tiempos para abordar versiones embrionarias de tales preocupaciones, es que el orden es sacado del caos por una inteligencia suprema. La experiencia humana se alinea con este giro inspirado antropomórficamente. Después de todo, gran parte del orden que encontramos diariamente en la civilización moderna *es obra de* la inteligencia. Pero una exégesis adecuada de la segunda ley hace innecesario un diseñador inteligente. Tan sorprendente como notable, las regiones que contienen energía y orden concentrados (siendo las estrellas el ejemplo arquetípico) son una consecuencia natural del universo que sigue diligentemente la línea de la segunda ley y se vuelve cada vez más desordenado. De hecho, tales bolsas de orden resultan ser catalizadores que facilitan que el universo, a largo plazo, alcance su potencial

entrópico. A lo largo del camino, y como parte de esta progresión entrópica, también facilitan el surgimiento de la vida.

Para explorar la danza entre el orden y el desorden que se desarrolla a lo largo de la historia cosmológica, comenzamos por el principio.

Esbozando el Big Bang

A mediados de la década de 1920, el sacerdote jesuita Georges Lemaître utilizó la recién acuñada descripción de la gravedad de Einstein -la teoría general de la relatividad- para desarrollar la idea radical de un cosmos que comenzó con un estallido y se ha estado expandiendo desde entonces. Lemaître no era un físico de sillón. Se doctoró en el Instituto Tecnológico de Massachusetts y fue uno de los primeros científicos en aplicar las ecuaciones de la relatividad general al cosmos en su conjunto. La intuición de Einstein, que le había guiado con éxito a través de una exquisita década de descubrimientos sobre la naturaleza del espacio, el tiempo y la materia, era que los objetos *del* universo tienen un principio, un medio y un fin, pero el universo en sí mismo siempre lo fue y siempre lo será. Cuando el análisis de Lemaître de las ecuaciones de Einstein sugirió lo contrario, Einstein lo despidió de plano, diciéndole al joven investigador, "Sus cálculos son correctos pero su física es abominable". [1] Einstein enfatizó que se puede ser adepto a la manipulación de ecuaciones y sin embargo carecer del buen gusto científico para decidir cuál de esas manipulaciones matemáticas refleja la realidad.

Unos años más tarde, Einstein realizó uno de los más famosos giros científicos. Observaciones detalladas del astrónomo Edwin Hubble, trabajando en el Observatorio del Monte Wilson, revelaron que las galaxias distantes están todas en movimiento. Todas se están alejando. Y el patrón de su éxodo, cuanto más lejos de la galaxia, mayor es la velocidad, concuerda con la salida matemática de las ecuaciones de la relatividad general. Con los datos que ahora apoyan la abominable física de Lemaître, Einstein abrazó de todo corazón la concepción de un universo que tuvo un comienzo.[2]

En el siglo transcurrido desde los innovadores cálculos de Lemaître, la teorización cosmológica que inició, junto con el trabajo independiente del físico ruso Alexander Friedmann, se ha desarrollado sustancialmente y se ha acumulado un corpus de pruebas de observación de los telescopios terrestres y espaciales. Aquí está el relato cosmológico moderno que ha surgido: Hace unos 14.000 millones de años, todo el universo observable -todo lo que podemos ver con los telescopios más poderosos que se puedan imaginar- se comprimió en una pepita increíblemente caliente e increíblemente densa, que luego se expandió rápidamente. Al enfriarse al hincharse, las partículas redujeron gradualmente su frenético movimiento y se agregaron en grupos, que con el tiempo formaron estrellas, planetas, todo tipo de desechos gaseosos y rocosos dispersos por el espacio, y a nosotros.

En dos frases, esa es la historia. Refinémosla. Examinemos cómo, sin intención o diseño, sin previsión o juicio, sin planificación o deliberación, el cosmos produce configuraciones meticulosamente ordenadas de partículas desde los átomos a las estrellas hasta la vida. Entendamos cómo el surgimiento de tales estructuras ordenadas se cuadra con el decreto de la segunda ley de implacable aumento del desorden. Presenciemos el doble paso entrópico que ahora se realiza en el escenario cosmológico.

Para ello, necesitaremos comprender más a fondo varios detalles cosmológicos. En primer lugar: ¿Qué impulsó a la pepita primordial a empezar a expandirse en primer lugar? O, en un lenguaje más amplio, ¿qué fue lo que encendió el big bang?

Gravedad repulsiva

Los antónimos abundan porque la experiencia está llena de opuestos. La física también tiene su parte: orden y desorden, materia y antimateria, positivo y negativo. Pero desde la época de Newton, la fuerza de gravedad parecía estar separada de este patrón común. A diferencia de la fuerza electromagnética, que puede empujar o tirar, la gravedad parecía ser sólo una fuerza de atracción. Según Newton, la gravedad ejerce una atracción entre los objetos, ya sean partículas o planetas, que los une, pero nunca a la inversa. En ausencia de un principio que requiera simetría en todo el funcionamiento de la naturaleza, la mayoría de los que pensaban profundamente en la gravedad veían su carácter unidireccional como una cualidad intrínseca que simplemente tenía que ser aceptada. Einstein cambió esto. Según la teoría general de la relatividad, la fuerza gravitatoria *puede* ser repulsiva. Newton no anticipó la gravedad repulsiva, y ni usted ni yo la hemos experimentado nunca. Pero la gravedad repulsiva hace justo lo que su nombre sugiere. En lugar de tirar hacia dentro, empuja hacia fuera. De acuerdo con las ecuaciones de Einstein, las grandes cosas grumosas como las estrellas y los planetas ejercen la habitual versión atractiva de la gravedad, pero hay situaciones exóticas en las que la fuerza gravitatoria puede separar las cosas.

Aunque la capacidad de la fuerza gravitatoria para ser repulsiva era conocida por Einstein, así como por varios científicos posteriores que trabajaron en la teoría general de la relatividad, su aplicación más profunda tardó más de medio siglo en ser descubierta. Como un joven postdoctorado que contemplaba el Big Bang, Alan Guth se dio cuenta de que la gravedad repulsiva podría resolver un misterio cósmico confuso. Las observaciones revelan que el espacio se está expandiendo. Las ecuaciones de Einstein coinciden. Pero las ecuaciones no dicen nada sobre la pregunta de qué fuerza, hace miles de millones de años, provocó la expansión. Los detallados análisis matemáticos de Guth, que culminaron con un frenesí de cálculos a altas horas de la noche en diciembre de 1979, hicieron que las ecuaciones hablaran.

Guth se dio cuenta de que si una región del espacio estaba llena de un tipo particular de sustancia, algo que me gusta llamar "combustible cósmico", y si la energía contenida en el combustible cósmico se extendía uniformemente por toda la región - no se aglomeraba como una estrella o un planeta - entonces la fuerza gravitatoria resultante sería realmente repulsiva. Más precisamente, los cálculos de Guth revelaron que si una pequeña región, quizás tan pequeña como una milmillonésima de una milmillonésima de un metro de

diámetro, era impregnada con un cierto tipo de campo de energía (llamado *campo de inflado,* siendo la "i" que falta una convención de denominación intencional aunque extravagante), y si la energía se distribuyera uniformemente, como el vapor cuya densidad es la misma en toda una sauna, el repulsivo empuje gravitacional sería tan fuerte que la mota del espacio se inflaría de forma explosiva, casi instantáneamente extendiéndose al tamaño del universo observable, si no mucho más grande. La gravedad repulsiva impulsaría así un estallido. Y un gran estallido en eso. [3]

A principios de los años 80, el físico soviético Andrei Linde y el dúo americano Paul Steinhardt y Andreas Albrecht tomaron el relevo de Guth y siguieron el concepto, desarrollando las primeras versiones totalmente viables de la cosmología *inflacionaria.* En las décadas siguientes, estos primeros trabajos han inspirado miles de páginas de intrincados cálculos matemáticos y una gran cantidad de simulaciones informáticas detalladas, llenando las revistas de todo el mundo con explicaciones y predicciones basadas en el supuesto de un pasado inflacionario. Muchas de estas predicciones han sido ahora confirmadas por medidas astronómicas minuciosamente precisas. Aunque no voy a hacer un recorrido completo por el caso de la observación de la cosmología inflacionaria, algo ampliamente cubierto en muchos artículos y libros, voy a describir un éxito que muchos físicos consideran el más convincente de todos. Es también el rasgo que necesitaremos para el siguiente paso en el desarrollo cósmico: la formación de estrellas y galaxias.

El Afterglow

A medida que el universo primitivo se extendía rápidamente, su calor abrasador se propagó en una extensión cada vez mayor, disminuyendo en intensidad y enfriándose constantemente. [4] Los físicos ya en la década de 1940, mucho antes de que se desarrollara la teoría inflacionaria, se dieron cuenta de que el calor primordial, reducido por la expansión espacial a un suave resplandor, aún debía impregnar el universo. Apodado el "resplandor de la creación" (o, en la jerga técnica, la "radiación cósmica de fondo de microondas"), este notable remanente cosmológico fue detectado por primera vez en la década de 1960 por los investigadores del Bell Lab Arno Penzias y Robert Wilson, cuya avanzada antena de telecomunicaciones aprovechó sin querer una radiación difusa que permeaba el espacio, a sólo 2,7 grados sobre el cero absoluto. Si estuviste en los años 60, podrías haber aprovechado la radiación también. Parte de la estática de un televisor de estilo antiguo sintonizado en un canal que había concluido su emisión para la noche se habría debido a este vestigio del big bang.

La cosmología inflacionaria refina la predicción de un resplandor posterior teniendo en cuenta la mecánica cuántica, las leyes desarrolladas en las primeras décadas del siglo XX para describir los procesos físicos que se desarrollan en el micromundo. Ya que estamos enfocados en todo el universo, algo grande, se podría pensar que la preocupación de la física cuántica por todo lo pequeño lo haría irrelevante. Y si no fuera por la cosmología inflacionaria, tu intuición estaría en el blanco. Pero así como estirar un trozo de lycra revela el intrincado patrón de sus puntos, estirar el espacio a través de una ráfaga de expansión inflacionaria revela rasgos cuánticos normalmente acordonados en el micromundo. En

esencia, la expansión inflacionaria llega al micromundo y extiende los rasgos cuánticos por todo el cielo.

El efecto cuántico de mayor relevancia es el mismo que estableció una ruptura irrefutable con la tradición clásica: el *principio de incertidumbre mecánica cuántica.* Descubierto en 1927 por el físico alemán Werner Heisenberg, el principio de incertidumbre demostró que hay características del mundo -como la posición y la velocidad de una partícula- que un físico clásico en el molde de Isaac Newton afirmaría categóricamente que pueden especificarse con total certeza, pero que un físico cuántico se da cuenta de que están cargadas de una confusión cuántica que las hace inciertas. Es como si la tradición clásica viera el mundo a través de gafas prístinas y pulidas que enfocan perfectamente todos los rasgos físicos, mientras que las gafas de la perspectiva cuántica son inherentemente borrosas. En el gran mundo cotidiano de la experiencia común, la niebla cuántica es demasiado fina para impactar nuestra visión, por lo que las perspectivas clásica y cuántica apenas se distinguen. Pero cuanto más pequeñas sondas, más se empañan las lentes cuánticas y más borrosa es la vista.

La metáfora podría sugerir que todo lo que necesitamos hacer es limpiar los lentes cuánticos. Pero el principio de incertidumbre estableció que no importa cuán fastidiosos seamos y sin importar el equipo avanzado que utilicemos, siempre habrá una mínima cantidad de niebla que no pueda ser limpiada. De hecho, mi fraseología traiciona el sesgo de la experiencia humana. Sólo en comparación con la visión clásica demostrablemente incorrecta -la visión que los humanos descubrimos primero porque es a la vez más simple y extraordinariamente precisa en las escalas accesibles a los sentidos humanos- la realidad cuántica *parece confusa*. En realidad es la perspectiva clásica la que proporciona una visión aproximada y por lo tanto imprecisa de la verdadera realidad cuántica.

No sé por qué la realidad se rige por leyes cuánticas. Nadie lo sabe. Un siglo de experimentos ha confirmado una montaña de predicciones de mecánica cuántica, y por eso los científicos abrazan la teoría. Aún así, para la mayoría de nosotros la mecánica cuántica sigue siendo totalmente extraña porque sus características distintivas emergen a distancias tan pequeñas que no las experimentamos en la vida cotidiana. Si lo hiciéramos, la intuición común estaría moldeada directamente por los procesos cuánticos y la física cuántica sería una segunda naturaleza. Por mucho que conozcas las implicaciones de la física newtoniana en tus huesos, puedes agarrar rápidamente un vaso que cae, intuyendo instantáneamente su trayectoria newtoniana, también conocerías la física cuántica en tus huesos. Pero al carecer de tal intuición cuántica, dependemos de los experimentos y las matemáticas para moldear nuestra comprensión al retratar aspectos de la realidad que no podemos experimentar directamente.

El ejemplo más discutido, ya mencionado, se refiere al comportamiento de las partículas, donde aprendemos a modificar las trayectorias agudas inherentes a la física clásica superponiendo el incesante movimiento tembloroso de la incertidumbre cuántica. Mientras una partícula transita de aquí a allá, un físico clásico podría dibujar su trayectoria con una pluma puntiaguda, mientras que un físico cuántico pasaría su dedo a lo largo de la tinta húmeda, difuminando el camino. [5] Pero la mecánica cuántica tiene una relevancia que

va más allá del movimiento de las partículas individuales, y para la cosmología el principio de incertidumbre cuántica tiene una influencia decisiva en el campo de inflado que alimenta la rápida expansión del espacio. Aunque describí el valor del inflado como uniforme, tomando el mismo valor en todas las ubicaciones dentro de la zona de inflado del espacio, la incertidumbre cuántica lo difumina. La incertidumbre superpone los nervios cuánticos a la uniformidad clásica, dando como resultado que el valor del campo, y por lo tanto su energía, sea un poco más alta aquí y un poco más baja allá.

Cuando la expansión inflacionaria estira rápidamente estas minúsculas variaciones de energía cuántica, se extienden por el espacio haciendo que la temperatura sea un poco más caliente por aquí y un poco más fría por allá. No por mucho. Los análisis matemáticos, llevados a cabo por primera vez por los físicos en los años 80, mostraron que las temperaturas de los puntos calientes y fríos diferirían tan sólo una parte en cien mil. Pero los análisis matemáticos también sugirieron que las diminutas variaciones de temperatura serían visibles si se supiera cómo buscarlas. Los cálculos revelaron que los nervios cuánticos alargados dan como resultado un patrón distinto de variaciones de temperatura a través del espacio, una huella cosmológica disponible para la ciencia forense astronómica. De hecho, desde principios de los años 90, una secuencia de telescopios desplegados por encima de las distorsiones causadas por la atmósfera terrestre han confirmado el patrón predicho de las variaciones de temperatura con una precisión cada vez mayor.

Tómese un momento para dejar que esto se hunda. Los físicos describen los primeros momentos del universo usando las ecuaciones de Einstein, actualizadas para incluir el hipotético campo de energía de Guth que llena el espacio, sujeto a la incertidumbre cuántica que aprendimos de Heisenberg. Los análisis matemáticos del estallido inflacionario revelan entonces que debería haber dejado una huella indeleble, un fósil de la creación en forma de un patrón específico de diminutas variaciones de temperatura a través del cielo nocturno. Sofisticados termómetros espaciales construidos casi catorce mil millones de años más tarde por una especie que acaba de alcanzar la edad científica aquí en la Vía Láctea han detectado ahora precisamente ese patrón.

Es un éxito espectacular, que demuestra una vez más la asombrosa capacidad de las matemáticas para encapsular los patrones de la naturaleza. Pero sería demasiado fuerte para concluir que las observaciones prueban que se produjo un estallido de expansión inflacionaria. Si nos centramos en los acontecimientos cosmológicos que tuvieron lugar hace miles de millones de años, a una escala energética probablemente millones de miles de millones de veces superior a la que podemos investigar en el laboratorio, lo mejor que podemos hacer es juntar las observaciones y los cálculos para crear confianza en nuestras explicaciones. Si un estallido inflacionario fuera la única forma de entender los datos cosmológicos, nuestra confianza se acercaría más a la certeza, pero a lo largo de los años científicos imaginativos han desarrollado enfoques alternativos (encontraremos uno de ellos en el capítulo 10). En resumen, mi opinión, compartida por muchos investigadores, es que si bien debemos estar abiertos a nuevas ideas que desafíen las perspectivas dominantes, el argumento a favor de la cosmología inflacionaria desarrollada en los últimos cuarenta años es formidable. [6] Y así, a medida que nuestro viaje avanza, seguiremos, en su mayor parte, la pista de la inflación.

Con esa evaluación, consideremos ahora cómo un comienzo inflacionario interactúa con el impulso de la segunda ley hacia un mayor desorden.

El Big Bang y la Segunda Ley

A pesar de los siglos de progreso científico, no estamos más cerca de responder a la pregunta planteada por Gottfried Leibniz - "¿Por qué hay algo en lugar de nada?" - que cuando el filósofo alemán expresó por primera vez esta magra destilación del misterio de la existencia. No es que la gente no haya propuesto ideas creativas y teorías provocativas. Pero al hacer una pregunta de origen último, buscamos una respuesta que no requiere antecedentes, una respuesta que no haga retroceder la pregunta un paso más, una respuesta que sea inmune a las preguntas de seguimiento "¿Por qué las cosas fueron así en vez de *así*?" o "¿Por qué *estas* leyes en vez de *aquellas*?" Ninguna explicación propuesta hasta ahora ha logrado esto o ni siquiera se ha acercado.

El marco inflacionario seguramente no lo ha hecho. La inflación requiere una lista de ingredientes que incluye el espacio, el tiempo, el combustible cósmico que impulsa la expansión (el campo de inflado), así como todo el aparato técnico de la mecánica cuántica y la relatividad general, que a su vez se apoyan en las matemáticas, desde el cálculo multivariable y el álgebra lineal hasta la geometría diferencial. No se conoce ningún principio que señale estas leyes físicas particulares, articuladas mediante estas construcciones matemáticas particulares, como el punto de partida inevitable para explicar el universo. En cambio, nosotros los físicos usamos la observación y el experimento, junto con una sensibilidad matemática intuitiva difícil de describir, para guiarnos hacia leyes físicas particulares. Luego analizamos las leyes matemáticas para determinar qué condiciones ambientales en los primeros momentos del universo, si las hubiera, habrían provocado la rápida expansión del espacio. Al encontrar, felizmente, que existen tales condiciones, *postulamos* que se mantuvieron cerca del big bang y utilizamos las ecuaciones para determinar lo que posteriormente habría ocurrido.

Esto es lo mejor que podemos hacer actualmente. Y no es nada para estornudar. El hecho de que podamos usar las matemáticas para describir lo que creemos que ocurrió hace casi 14.000 millones de años, y a partir de eso predecir con éxito lo que los poderosos telescopios deberían ver ahora, bueno, es impresionante. Claro que abundan las preguntas profundas, como qué o quién creó el espacio y el tiempo, y qué o quién impuso el control guía de las matemáticas, y qué o quién es responsable de que haya algo en absoluto, pero incluso con todo lo que quedó sin respuesta hemos obtenido una poderosa visión del desarrollo cósmico.

Mi intención aquí es usar esa perspicacia para comprender cómo un universo con una entropía cada vez mayor, destinado a un desorden cada vez mayor, crea una riqueza de orden a lo largo del camino. Con eso como nuestro objetivo, empecemos con la observación más básica, aludida en el capítulo anterior. Si la entropía ha estado aumentando constantemente desde el Big Bang, entonces la entropía en el Big Bang debe haber sido mucho más baja de lo que es hoy en día.[7]

¿Qué vamos a hacer con esto?

Bueno, ya te has acostumbrado a encogerte de hombros cuando te encuentras con una configuración de alta entropía, ya sean monedas dispuestas en una mezcla aleatoria de cara y cruz, vapor que impregna uniformemente tu baño, o aromas esparcidos por toda tu casa. Las configuraciones de alta entropía son esperadas, comunes y corrientes. Pero al encontrar una configuración de baja entropía, se da cuenta de que su reacción debe ser diferente. Una configuración de baja entropía es especial. Es inusual. Exige una explicación de cómo se llegó a un estado de cosas tan ordenado.

Cuando se aplica al universo primitivo, este razonamiento ha generado su cuota de escarceos científicos y filosóficos. ¿Por qué fuerza o proceso adquirió el universo primitivo baja entropía? Cien peniques con todas las cabezas tiene baja entropía y sin embargo admite una explicación inmediata: en lugar de tirar las monedas sobre la mesa, alguien las arregló cuidadosamente. ¿Pero qué o quién arregló la configuración especial de baja entropía del universo primitivo? Sin una teoría completa de los orígenes cósmicos, la ciencia no puede dar una respuesta. De hecho, aunque es una pregunta que me ha mantenido despierto durante muchas noches (literalmente), la ciencia aún no puede determinar si es un tema digno de cualquier angustia. La falta de comprensión de por qué hay algo en lugar de nada equivale a la falta de medios para juzgar cuán exótico u ordinario es ese algo en realidad. Para evaluar si las condiciones detalladas del universo temprano requieren un encogimiento de hombros o una doble toma de vista requiere delinear el proceso por el cual esas condiciones fueron establecidas.

Un escenario que los cosmólogos han considerado imagina que el universo primitivo era un ambiente frenético y caótico, y como resultado el valor del campo de inflado a través del espacio habría fluctuado salvajemente, algo así como la superficie del agua hirviendo. Para generar una gravedad repulsiva y desencadenar el estallido, necesitamos una pequeña región del espacio en la que el valor del inflado fuera uniforme (o muy parecido, teniendo en cuenta los nervios cuánticos). Pero encontrar una región tan uniforme en medio de las ondulaciones caóticas sería como hervir una cuba de agua y encontrar una región en su superficie agitada que se hubiera aplanado repentinamente. Nunca has visto que eso suceda. No porque sea imposible, sino porque es extraordinariamente improbable. Para que una región del agua burbujeante de la cuba pase a través de la misma altura en el mismo momento, dando una configuración plana, ordenada, uniforme y de baja entropía, se requeriría una asombrosa coincidencia. De manera similar, para que el campo de inflado salvajemente ondulado haya adquirido un valor uniforme dentro de una pequeña región del espacio, encendiendo así la expansión inflacionaria, habría requerido también una asombrosa coincidencia. Y sin una explicación de cómo esta configuración especial, ordenada, de baja entropía y uniforme llegó a ser, los físicos están profundamente inquietos.[8]

Buscando el alivio de la incomodidad, algunos investigadores se basan en una simple observación: si esperas lo suficiente, incluso la más improbable de las cosas sucederá. Agitar cien peniques suficientes veces y eventualmente aterrizarán todas las cabezas. Sería prudente no contener la respiración esperando este resultado, pero sucederá. De forma similar, podemos argumentar que en un entorno caótico en el que el valor del inflado

fluctúa salvajemente, tarde o temprano -por pura casualidad- habrá una pequeña región en la que las variaciones aleatorias que impulsan el valor del campo hacia arriba o hacia abajo se alinearán, dando como resultado que el campo tenga el mismo valor en todas partes. Esto requiere una casualidad estadística, lo que resulta en un mayor orden y por lo tanto en una menor entropía, pero en ocasiones *sucederá*. No muy a menudo. Pero según esta perspectiva, no te preocupes. Dado que todas estas maquinaciones habrían tenido lugar durante un período de la prehistoria, antes de la rápida expansión del espacio que llamamos el big bang, no había nadie merodeando, con los brazos cruzados y los zapatos golpeando, esperando que la expansión inflacionaria se encendiera. Así que dejemos que el preestreno inflacionario dure lo que sea necesario. Sólo cuando ocurre la casualidad estadística de un parche de inflado uniforme, las cosas cambian finalmente: se produce el big bang, el espacio se infla y comienza la actuación cosmológica.

Aunque nada de esto aborda las cuestiones más fundamentales del origen (el origen del espacio, o del tiempo, o de los campos, o de las matemáticas, etc.), muestra cómo un entorno caótico puede producir las condiciones especiales, ordenadas y de baja entropía que requiere la inflación. Cuando una pequeña mota de espacio finalmente hace el salto estadísticamente improbable a la baja entropía, la gravedad repulsiva salta a la acción y la impulsa hacia un universo en rápida expansión, el big bang.

Esta no es la única propuesta de cómo la expansión inflacionaria puede haber despegado. Andrei Linde, uno de los pioneros de la cosmología inflacionaria, ha dicho que por cada tres investigadores hay al menos nueve opiniones al respecto. [9] Así que debemos dejar para futuras investigaciones, teóricas y observacionales, una respuesta más definitiva sobre cómo una pequeña región del espacio se llenó uniformemente con un campo de inflado, desencadenando así un estallido de expansión espacial. Por ahora, simplemente asumiremos que de una forma u otra, el universo temprano hizo la transición a esta configuración de baja entropía y altamente ordenada, provocando el estallido y permitiéndonos declarar que el resto es historia.

Partiendo de este punto de partida, nos ponemos en marcha para explorar cómo se forman estructuras ordenadas como estrellas y galaxias en un universo que se precipita hacia un futuro cada vez más desordenado.

El origen de la materia y el nacimiento de las estrellas

Dentro de una milmillonésima de una milmillonésima de segundo después del big bang, la gravedad repulsiva estiró enormemente una pequeña región del espacio, tal vez mucho más grande que los alcances más distantes accesibles a los telescopios más avanzados posibles. [10] El espacio permaneció lleno del campo de inflado, pero en otra diminuta fracción de segundo eso también cambió. Como la energía en la superficie de una pompa de jabón en expansión, la energía en una región del espacio en expansión llena de inflado es precaria. Es inestable. De la misma manera que la pompa de jabón eventualmente se reventará, transformando su energía en una niebla de gotas de agua jabonosa, el campo inflado eventualmente "reventará" también, se desintegrará, transformando su energía en una niebla de partículas.

No conocemos la identidad precisa de estas partículas, pero podemos decir con confianza que no eran los constituyentes ordinarios de la materia de los que se aprendió en la escuela secundaria. Sin embargo, con el paso de sólo unos pocos minutos más, se produjo una cascada de rápidas reacciones de partículas a través de todo el espacio -partículas pesadas que se desintegraban en aerosoles de otras más ligeras; partículas con fuertes afinidades que se unían en estrechos conglomerados- transformando el baño primordial en una población de protones, neutrones y electrones, la materia de la materia familiar (y, probablemente también, un suministro de otras partículas más exóticas, como la materia oscura, atestiguado por una larga historia de observaciones astronómicas [11]). Poco después del estallido, el universo se llenó de una niebla caliente, casi uniforme, de partículas, algunas familiares, otras no tanto, que flotaban en una creciente extensión espacial.

He calificado "uniforme" con "casi" porque los nervios cuánticos del campo de inflado no sólo producen variaciones de temperatura en el resplandor del big bang, sino que también aseguran que cuando el inflado se desintegre, la densidad de las partículas resultantes variará ligeramente a través del espacio, siendo un toque más alto aquí, un toque más bajo allá, y así sucesivamente. Estas variaciones son cruciales para lo que sucede a continuación: el importantísimo impulso hacia las cosas grumosas como las estrellas y las galaxias. Una región que es ligeramente más densa que sus vecinas ejerce una atracción gravitacional ligeramente mayor y así absorbe un contingente ligeramente mayor de las partículas circundantes. La región se vuelve aún más densa y ejerce una mayor atracción gravitacional, absorbiendo más material. Es un efecto de bola de nieve impulsado por la gravedad que produce grupos de materia cada vez más grandes. Si se espera lo suficiente, del orden de cientos de millones de años, la bola de nieve gravitacional produce aglomeraciones de partículas tan masivas, tan comprimidas y tan calientes que encienden procesos nucleares, dando lugar a estrellas. La incertidumbre cuántica, magnificada por el estiramiento inflacionario y concentrada por la bola de nieve gravitacional, da como resultado los puntos de luz que salpican el cielo nocturno.

La pregunta, entonces, es esta: ¿Cómo encaja el proceso de formación de estrellas, en el que la gravedad induce un desordenado y casi uniforme baño de partículas para formar estructuras astrofísicas ordenadas, con el decreto de la segunda ley de creciente desorden? La respuesta requiere que examinemos, con un poco más de cuidado, los caminos hacia una mayor entropía.

Los obstáculos en el camino hacia el desorden

A medida que el pan se hornea en el horno, las partículas liberadas se extienden hacia fuera, ocupando un volumen cada vez mayor, y así crece su entropía. Pero si estás en una habitación lejana, no disfrutarás inmediatamente del aroma del pan recién horneado. Toma tiempo para que el aroma se extienda por toda la casa. Tienes que esperar a que las moléculas de aroma emigren hacia afuera y ocupen los arreglos de mayor entropía que están disponibles. Esto es típico. Los sistemas físicos generalmente no pueden saltar

directamente a la configuración de entropía máxima. En cambio, a medida que las partículas del sistema serpentean aleatoriamente, la entropía aumenta gradualmente hacia el máximo posible.

A lo largo del camino hacia una mayor entropía también puede haber obstáculos que impiden el progreso. Sellar el horno o cerrar la puerta de la cocina y se hace más difícil que el aroma se extienda, frenando así el aumento de la entropía. Tales obstáculos se deben a la intervención humana, pero hay otras situaciones en las que los obstáculos entrópicos surgen de las leyes que rigen las interacciones físicas en sí mismas. Un ejemplo con el que estoy íntimamente familiarizado por un incidente de la infancia también involucra un horno.

Un día en cuarto grado llegué a casa de la escuela y decidí calentar unas sobras de pizza que encontré en el refrigerador. Giré el horno a cuatrocientos grados, coloqué la pizza en el estante del medio y esperé. Después de unos diez minutos comprobé su progreso y me sorprendió que la pizza estuviera tan fría como cuando la desenvolví. Entonces me di cuenta de que aunque había encendido el gas, había olvidado encender el horno. (Nuestro modesto horno, típico del día, no tenía un piloto incorporado, así que cada uso requería que se encendiera.) Siguiendo un procedimiento que había visto a mis padres realizar cientos de veces, me incliné en el horno y golpeé un fósforo, con la intención de meterlo en el pequeño agujero piloto del horno. Para entonces se había acumulado un gas considerable en el interior del horno, y cuando encendí el fósforo, explotó. Una pared de llamas corrió hacia mí. Cerré los ojos con fuerza mientras el fuego pasaba, chamuscando mis cejas y pestañas, y dejando mi cara y mis orejas con quemaduras de segundo y tercer grado. La lección de vida inmediata, enfatizada por mis padres y reforzada por los meses de dolorosa curación, se centró en el uso adecuado de los aparatos de cocina. (Finalmente volví a la silla de montar y ahora hago la mayor parte de la cocina, aunque experimento un malestar momentáneo cuando mis hijos, preparando sus propias comidas, encienden el horno). Pero el punto científico más importante es que puede haber obstáculos en el camino hacia una mayor entropía que sólo se pueden superar con la ayuda de un catalizador. Esto es lo que quiero decir.

El gas natural (que es principalmente metano, una unión de carbono e hidrógeno) puede coexistir pacíficamente con el oxígeno del aire; las moléculas de cada gas pueden salir sin problemas. Sin embargo, a medida que las moléculas se extienden y se intercalan, una configuración de entropía distinta y mucho más alta llama la atención. Pero esa configuración no puede alcanzarse simplemente permitiendo que las moléculas continúen abriéndose en abanico. La configuración de entropía superior requiere una reacción química. No se preocupe por los detalles, pero déjeme explicarlo brevemente. Una molécula de gas natural puede combinarse con dos moléculas de oxígeno dando como resultado una molécula de dióxido de carbono, dos de agua y, lo que es más importante, un estallido de energía. A nivel de moléculas, esto es lo que significa que el gas natural se quema. La reacción química libera energía contenida en los estrechos lazos que mantienen las moléculas de gas juntas, algo así como lo que sucede cuando una colección de bandas elásticas tensas se rompen. En el caso de mi escape del horno, ese estallido de energía ardiente -moléculas altamente agitadas y de movimiento rápido- me quemó la cara. Todo esto nos dice que al liberar la energía almacenada en los enlaces químicos ordenados y

transformarla en el movimiento caótico de las moléculas que se mueven rápidamente, tales reacciones químicas producen un fuerte aumento de la entropía.

Aunque los detalles son específicos del lamentable percance de un niño, el episodio demuestra un principio físico ampliamente aplicable. Puede haber badenes en la carretera entrópica: si se dejan solos, el gas natural y el oxígeno no se combinan, no se queman, y no alcanzan la configuración de entropía más alta disponible. Estos componentes químicos son capaces de superar el obstáculo entrópico sólo con la ayuda de un catalizador que puede iniciar la reacción. Para mí, el catalizador era un fósforo ardiendo. La pequeña llama que me golpeó mi cuarto grado desencadenó un efecto dominó. La energía de la llama rompió los enlaces que mantenían unidas algunas de las moléculas del gas natural, permitiendo que los átomos de carbono e hidrógeno recién liberados se combinaran con los átomos de oxígeno del ambiente, lo que liberó energía adicional que cortó más enlaces del gas natural, impulsando el proceso hacia adelante. Y hacia adelante. La explosión fue la cascada de energía generada por la rápida reorganización de los enlaces químicos.

Obsérvese que los enlaces químicos dependen de la fuerza electromagnética. Los protones cargados positivamente atraen electrones cargados negativamente ("a diferencia de las cargas eléctricas que atraen"), sujetando los componentes atómicos en uniones moleculares. Lo que significa que el salto entrópico de la calma entremezclada de las moléculas de gas a la quema explosiva generada por la ruptura y la forja de los enlaces químicos es impulsado por la fuerza electromagnética. Tal es el caso de muchos de los procesos de aumento de la entropía que experimentamos en la vida cotidiana.

Aunque menos familiar aquí en la Tierra, en episodios que se repiten en el cosmos, la evolución hacia una mayor entropía es frecuentemente impulsada por otras fuerzas de la naturaleza: la fuerza gravitatoria y las fuerzas nucleares (la fuerza nuclear fuerte mantiene unidos los núcleos atómicos, mientras que la fuerza nuclear débil genera la desintegración radiactiva). Y como hemos visto ahora en el caso de la fuerza electromagnética, el camino hacia una mayor entropía marcada por la gravedad y las fuerzas nucleares tampoco tiene por qué ser fácil. Puede haber obstáculos, y a menudo los hay. La forma en que el universo supera estos obstáculos, el análogo cósmico de mi golpe de fósforo, es un asunto sutil. Pero es un asunto que debería preocuparnos profundamente a todos. Entre las estructuras transitorias que se forman como la gravedad y las fuerzas nucleares guían al universo hacia una mayor entropía están las estrellas y los planetas, y aquí en la Tierra, la vida. Por toda su majestuosidad, estos arreglos ordenados son los caballos de batalla de la naturaleza, aprovechando la gravedad y las fuerzas nucleares para conducir al cosmos hacia la realización de su potencial de entropía.

Centrémonos primero en la gravedad.

La gravedad, el orden y la segunda ley

La gravedad es la más débil de las fuerzas de la naturaleza, un hecho que se hace evidente en la demostración más simple. Coge una moneda. Los músculos de tu brazo superan la atracción gravitatoria de toda la Tierra. Ya sea que te consideres blando o fornido, la

victoria sobre la atracción gravitatoria de un planeta resalta la debilidad intrínseca de la gravedad. La única razón por la que somos conscientes de la gravedad es que es una fuerza acumulativa: cada trozo de la Tierra tira de cada trozo de moneda, y de cada trozo de este libro, y de cada trozo de ti, y como hay un montón de Tierra, estos tirones se suman a las fuerzas descendentes que podemos sentir. Pero la atracción gravitatoria entre dos cosas más pequeñas, como dos electrones, es un millón de billones de billones de billones de veces más débil que su repulsión electromagnética.

La debilidad intrínseca de la gravedad es la razón por la que ni siquiera la mencionamos durante nuestra anterior exploración de la entropía. Si incluyéramos los efectos de la gravedad en situaciones cotidianas como la propagación del vapor en el baño o la deriva de los aromas por la casa, nuestra discusión sobre la entropía difícilmente cambiaría. Claro, la gravedad tira suavemente de las moléculas hacia abajo, causando que la densidad del vapor sea ligeramente mayor cerca del suelo del baño, pero el efecto es tan pequeño que para una comprensión cualitativa simplemente no importa. Sin embargo, si desplazamos nuestra atención de lo cotidiano y consideramos los procesos astronómicos que involucran mucha más materia, encontramos una interacción profundamente importante entre la entropía y la fuerza gravitacional.

Admito que las ideas que voy a explicar son un poco difíciles, así que siéntase libre de saltar a la siguiente sección para un resumen si en algún momento la discusión se vuelve demasiado gruesa para su gusto. Pero la recompensa de seguir conmigo vale la pena: la comprensión de cómo la gravedad esculpe espontáneamente el orden de un cosmos cada vez más desordenado.

Imaginen una versión cósmica del escenario de la panadería. En lugar de tu casa, imagina una caja enorme, mucho más grande que el sol, flotando en un espacio que de otra manera estaría vacío. Y en lugar de aromas que se filtran de tu horno, imagina que en el centro de la caja empezamos con una bola de gas (para ser exactos, imagina que es hidrógeno, el elemento más simple de la tabla periódica) cuyas moléculas salen al exterior. De nuestra experiencia con el aroma del pan a la deriva por toda la casa, esperamos que el gas evolucione hacia una mayor entropía a través de la dispersión de las moléculas hasta que llenen uniformemente la caja. Pero ahora cambiemos un poco las cosas. A diferencia del caso del pan, agreguemos tantas moléculas a la bola de gas que la gravedad *sí importa*: la atracción gravitatoria experimentada por cualquier molécula dada, debido a la atracción gravitatoria combinada ejercida por cada una de las gigantescas cantidades de otras moléculas de gas, afecta significativamente el movimiento de la molécula. ¿Cómo afecta esto a nuestra conclusión?

Bueno, ponte en el lugar de una molécula de gas que lidera la migración hacia el exterior. A medida que te alejas del cúmulo central, sientes un tirón gravitacional ejercido por todas las otras moléculas tirando de ti. Esa fuerza te frena. Una velocidad más lenta significa una temperatura más baja. Y así, a medida que la nube de gas aumenta su volumen total expandiéndose hacia afuera, la temperatura hacia la frontera disminuye. Tenlo en cuenta, y ahora salta conmigo a la perspectiva de una molécula situada más cerca del grueso de la nube. Estando más cerca, sientes una atracción gravitacional mucho más fuerte comparada con tu experiencia anterior en una frontera lejana. De hecho, con suficientes

moléculas, la atracción gravitatoria combinada será lo suficientemente fuerte para evitar que emigres hacia el exterior. En cambio, serás atraído hacia adentro. Así caerás hacia el centro del cúmulo de gas, aumentando la velocidad a medida que avanzas. Una velocidad más rápida significa una temperatura más alta, y así como la gravedad hace que el núcleo de la nube de gas se reduzca hacia dentro, disminuyendo su volumen, su temperatura sube.

Comparado con nuestra expectativa de hornear pan -que el gas, con el tiempo, se distribuya uniformemente por toda la caja y alcance una temperatura uniforme- vemos que cuando la gravedad importa el despliegue es completamente diferente. La gravedad hace que algunas moléculas sean arrastradas hacia un núcleo más caliente y denso, mientras que otras se desplazan hacia el exterior en una capa más fría y difusa que las rodea.

Por modestas que parezcan estas observaciones, hemos descubierto una de las manos guías más influyentes del orden en el universo. Permítanme elaborar.

Nunca has agarrado tu café matutino y lo has encontrado más caliente que cuando lo serviste. Esto se debe a que el calor sólo fluye de una temperatura más alta a una más baja, y por lo tanto su café caliente transfiere parte de su calor al ambiente más frío, causando que la temperatura del café disminuya. [12] Para nuestra gran nube de gas, el calor también fluye del núcleo central caliente a la cáscara más fría que lo rodea. No puedo culparte por pensar que este flujo de calor enfriará el núcleo y calentará la cáscara, acercando sus temperaturas, de la misma manera que el calor transferido de tu café al aire acerca tu taza caliente a la temperatura ambiente. Pero, y esto es notable y notablemente importante, cuando la gravedad dirige el espectáculo, la conclusión se invierte. *A medida que el calor sale del núcleo, el núcleo se calienta y la cáscara se enfría.*

Esto es seguramente contraintuitivo, pero entenderlo es sólo cuestión de conectar los puntos que ya hemos marcado. A medida que la cáscara circundante absorbe el calor del núcleo, la energía adicional impulsa a la nube a hincharse aún más. Las moléculas que se mueven hacia afuera, una vez más, se esfuerzan contra la atracción de la gravedad hacia adentro, y por lo tanto se desaceleran aún más. [13] El efecto neto es que la temperatura de la cáscara en expansión baja, no sube. Por el contrario, a medida que el núcleo cede calor, la disminución de energía hace que se contraiga aún más. Las moléculas que se mueven hacia el interior, fluyendo en la misma dirección que la atracción de la gravedad hacia el interior, aumentan su velocidad a medida que caen, y así la temperatura del núcleo que se contrae sube, no baja.

Si su café se comportara de esta manera, le aconsejaría que lo bebiera rápidamente. Cuanto más tiempo esperes, más calor cederá al aire circundante y más caliente se hará. Para el café, eso es absurdo. Pero para una nube de gas lo suficientemente grande como para que la gravedad juegue un papel dominante, esto es lo que sucede.

Reflexione un momento sobre esta conclusión y se dará cuenta de que nos hemos encontrado con un proceso auto-amplificador, muy parecido a lo que sucede con la deuda de las tarjetas de crédito: cuanto más se debe, más intereses se evalúan y mayor es la deuda, lo que hace que el ciclo se vuelva espiral. En el caso de una nube de gas, a medida que el núcleo se encoge y su temperatura aumenta, cederá aún más calor a los alrededores más frescos, haciendo que el núcleo se reduzca aún más y su temperatura aumente aún más. Al

mismo tiempo, el calor absorbido por el núcleo hace que se expanda aún más y que su temperatura descienda aún más. La brecha de temperatura cada vez mayor entre el núcleo y la cáscara hace que el calor fluya aún más vigorosamente e impulsa el ciclo en espiral hacia adelante.

Salvo que se intervenga o cambie la circunstancia, esos ciclos de autoamplificación continúan sin disminuir. Para aumentar la deuda de la tarjeta de crédito, se interviene enviando un pago o declarando la quiebra. Para el núcleo comprimido que se calienta cada vez más, la naturaleza interviene con un nuevo proceso físico: la *fusión nuclear*. Cuando una colección de átomos se calienta y se densifica lo suficiente, se unen con tal fuerza que pueden fusionarse más profundamente que en procesos químicos como la quema de gas natural. Mientras que la quema química es una reacción que involucra a los electrones que rodean a los átomos, la fusión nuclear es una reacción que une los núcleos en el centro de los átomos. A través de tal fusión profunda, la fusión nuclear genera copiosas cantidades de energía que se manifiestan como partículas de movimiento rápido. Y es un movimiento térmico tan rápido que genera una presión hacia afuera capaz de equilibrar la fuerza de gravedad hacia adentro. La fusión nuclear en el núcleo detiene así la contracción. El resultado es una fuente concentrada, estable y sostenida de calor y luz.

Nace una estrella.

Para apreciar cómo el proceso de formación cuenta en el marcador de entropía, sumemos las contribuciones. Tanto el núcleo de la nube de gas, que se convierte en la estrella, como la cáscara del gas que la rodea, están sujetos a dos efectos entrópicos que compiten entre sí. Para el núcleo, la temperatura sube, actuando para aumentar la entropía, y el volumen baja, actuando para disminuir la entropía. Sólo el cálculo detallado [14] puede determinar el ganador, siendo el resultado que la disminución excede el aumento, por lo que la entropía neta del núcleo baja. La formación de grandes grupos gravitatorios, como las estrellas, es de hecho un movimiento hacia un orden mayor. Para la envoltura circundante, el volumen sube, actuando para aumentar la entropía, y la temperatura baja, actuando para disminuir la entropía. Una vez más, se requiere un cálculo detallado para determinar el ganador, con el resultado de que el aumento excede a la disminución, por lo que la entropía neta de la cáscara sube. Igualmente importante es que los cálculos establecen que el aumento de la entropía del caparazón supera la disminución de la entropía del núcleo, asegurando que todo el proceso da como resultado un aumento general de la entropía, obteniendo un merecido asentimiento de la segunda ley.

La cadena de eventos, altamente idealizada y simplificada, muestra cómo una estrella - una bolsa de baja entropía, una bolsa de orden - puede producirse espontáneamente aunque ningún ingeniero dirija la acción y aunque la segunda ley de la termodinámica, con su dictado de que la entropía total aumenta, permanece en plena vigencia. Comparado con una máquina de vapor, el escenario cósmico es más exótico, pero lo que hemos encontrado es otro ejemplo de los dos pasos de la entropía. De la misma manera que una máquina de vapor y su entorno participan en una danza termodinámica, la máquina de vapor libera calor residual, causando que su entropía disminuya, mientras que el entorno absorbe el calor, causando que su entropía aumente, una nube de gas lo suficientemente grande como para que la gravedad de la materia participe en un análogo pas de deux. A medida que el

núcleo de dicha nube de gas se contrae bajo la atracción de la gravedad, su entropía disminuye, pero en el proceso libera calor que causa que la entropía del entorno aumente. Se crea una región local de orden dentro de un entorno que sufre un aumento más que compensatorio del desorden.

La nueva característica de la versión gravitacional del dos-pasos entrópico es que es auto-sostenible. A medida que la nube de gas se contrae y emite calor, su temperatura se eleva, causando que fluya más calor hacia afuera y haciendo que los dos pasos continúen avanzando. Por el contrario, cuando la máquina de vapor realiza un trabajo y emite calor, su temperatura baja. Sin quemar más combustible para calentar el vapor de vuelta, la máquina se apaga. Por eso la máquina de vapor requiere una inteligencia inteligente para diseñarla, construirla y alimentarla, mientras que la región de orden creada por una nube de gas en contracción -una estrella- está esculpida y alimentada por la fuerza de gravedad sin sentido.

La fusión, el orden y la segunda ley

Hagamos un balance.

Cuando la influencia de la gravedad es mínima, la segunda ley impulsa un sistema hacia la homogeneidad. Las cosas se dispersan, la energía se difunde, la entropía aumenta. Y si eso es todo lo que hay, la historia del universo, de principio a fin, sería insípida. Pero cuando hay suficiente materia para que la influencia de la gravedad sea significativa, la segunda ley emprende un rápido giro en U, y aleja al sistema de la homogeneidad. La materia se agrupa aquí y se extiende allá. La energía se concentra aquí y se difunde allí. La entropía disminuye aquí y aumenta allá. La forma en que se lleva a cabo la directiva de la segunda ley depende sensiblemente de la fuerza de gravedad. Cuando hay suficiente gravedad, se pueden formar estructuras ordenadas de materia suficientemente concentradas. Con eso, la historia del universo en desarrollo se vuelve mucho más rica.

Como se ha descrito, el papel estelar en este proceso lo juega la fuerza de la gravedad. En comparación, la fuerza nuclear, responsable de la fusión, parece decididamente secundaria. Su trabajo parece limitado a una intervención: la fusión da como resultado la presión hacia afuera que detiene el colapso hacia adentro impulsado por la gravedad. De hecho, un resumen improvisado que los científicos suelen ensayar es decir que la gravedad es la fuente última de toda estructura en el cosmos, sin asentir en absoluto al papel de la fuerza nuclear. Pero una valoración más generosa es que existe una asociación equitativa entre la gravedad y la fuerza nuclear, ya que trabajan en conjunto para avanzar en la narrativa de la segunda ley.

El punto es que la fuerza nuclear también baila los dos pasos entrópicos. Cuando los núcleos atómicos se fusionan -como en el sol, donde los núcleos de hidrógeno se fusionan en helio miles de millones y miles de millones de veces cada segundo- el resultado es un cúmulo atómico más complejo, más intrincadamente organizado y de menor entropía. En el proceso, parte de la masa de los núcleos originales se convierte en energía (según lo prescrito por $E = mc2$), principalmente en forma de una ráfaga de fotones que calienta el interior de la estrella y potencia la liberación de luz de la superficie de la estrella. Y es a

través de esa luz estelar tan ardiente, que es en sí misma un torrente de fotones que fluyen hacia el exterior, que la estrella transfiere copiosas cantidades de entropía al medio ambiente. De hecho, al igual que encontramos con la máquina de vapor, y con la nube de gas que se contrae, el aumento de la entropía ambiental compensa con creces la disminución de la entropía de los núcleos en fusión, asegurando que la entropía neta suba y que la integridad de la segunda ley quede una vez más asegurada.

Así como el gas natural y el oxígeno necesitan un catalizador (como el que yo uso para encender una cerilla) para iniciar la combustión química, los núcleos atómicos necesitan un catalizador para provocar la fusión nuclear. Para las estrellas, ese catalizador no es otra cosa que la fuerza de la gravedad, aplastando la materia en el núcleo hasta que se vuelve lo suficientemente caliente y densa para que la fusión se encienda. Una vez que la fusión comienza, puede alimentar a una estrella durante miles de millones de años, sintetizando implacablemente complejos núcleos atómicos a medida que extrae un tesoro de entropía que de otra manera sería inaccesible y que pulveriza hacia el exterior a través del calor y la luz. Y como veremos en el próximo capítulo, estos productos - átomos complejos y un baño constante de luz que fluye - son esenciales para la formación de estructuras aún más ricas e intrincadas, incluyendo a usted y a mí. Por lo tanto, aunque la gravedad es la fuerza vital en la formación de una estrella y en el mantenimiento de un entorno estelar estable, durante miles de millones de años es la fuerza nuclear la que está en primera línea, encabezando la carga entrópica. Desde esta perspectiva, el papel de la gravedad pasa de ser el protagonista principal a ser el socio indispensable en un largo dúo.

El resultado, antropomorfizado, es que el universo aprovecha inteligentemente las fuerzas gravitatorias y nucleares para luchar contra un alijo de entropía sin explotar que está encerrado dentro de sus componentes materiales. Sin gravedad, las partículas que se dispersan uniformemente, como un aroma que ha llenado su casa, han alcanzado la mayor entropía disponible. Pero con la gravedad, las partículas que son comprimidas en bolas masivas y densas apoyadas por la fusión nuclear impulsan la cuenta de entropía aún más alta.

Catalizada por la gravedad y ejecutada por la fuerza nuclear, esta versión de los dos pasos entrópicos es bailada por la materia clara a través del universo. Es un proceso que ha dominado la coreografía cósmica desde poco después del big bang, dando como resultado un gran número de estructuras astronómicas ordenadas por las estrellas cuyo calor y luz, al menos en un caso, permitieron el surgimiento de la vida. Ese desarrollo, como exploraremos en el próximo capítulo, implica una contrapartida de la entropía -evolución- que es capaz de dar forma a las estructuras más exquisitamente complejas del universo.

4

INFORMACIÓN Y VITALIDAD

De la estructura a la vida

"Querido Profesor Schrödinger", comenzó la modesta carta de 1953 del biólogo Francis Crick a Erwin Schrödinger, uno de los padres fundadores de la mecánica cuántica y ganador del premio Nobel de física en 1933. "Watson y yo estuvimos discutiendo una vez cómo entramos en el campo de la biología molecular, y descubrimos que ambos habíamos sido influenciados por su pequeño libro, '¿Qué es la vida?'. " Crick siguió la referencia al libro de Schrödinger con un regocijo que apenas pudo contener: "Pensamos que podría estar interesado en las reimpresiones adjuntas, verá que parece que su término 'cristal aperiódico' va a ser muy adecuado".[1]

El Watson al que se refiere Crick es, por supuesto, James Watson, coautor con Crick de las "reimpresiones adjuntas", que, aún recién salidas de la imprenta, incluían un artículo científico destinado a ser uno de los más célebres del siglo XX. En su forma publicada, este manuscrito ocuparía menos de una sola página de la revista, sin embargo, eso resultó ser adecuado para establecer la geometría de la doble hélice del ADN y conseguir que Crick y Watson, junto con Maurice Wilkins del King's College, obtuvieran el Premio Nobel de 1962. [2] Sorprendentemente, Wilkins también atribuyó al libro de Schrödinger el haber despertado su pasión por determinar las bases moleculares de la herencia; en palabras de Wilkins, "me puso en marcha".[3]

Schrödinger escribió *¿Qué es la vida?* en 1944, basado en una serie de conferencias públicas que había dado el año anterior en el Instituto de Estudios Avanzados de Dublín. Al anunciar las conferencias, Schrödinger señaló que su tema era desafiante y que "las conferencias no podían calificarse de populares", un compromiso loable de una exploración profunda del tema incluso a expensas de una audiencia disminuida. [4] A pesar de ello, durante tres viernes consecutivos en febrero de 1943, con la Segunda Guerra Mundial en el continente, un público de más de cuatrocientos -incluyendo al primer ministro irlandés, varios dignatarios y personas de la sociedad acaudalada- abarrotó un teatro de conferencias situado en la cima del edificio de piedra gris Fitzgerald en el campus del Trinity College para escuchar al físico nacido en Viena lidiar con la ciencia de la vida.[5]

La acusación de Schrödinger era avanzar en una cuestión primordial: "¿Cómo pueden los eventos *en el espacio y el tiempo* que tienen lugar dentro de los límites espaciales de un organismo vivo ser contabilizados por la física y la química?" O, parafraseando vagamente: Las rocas y los conejos son diferentes. ¿Pero cómo? ¿Y por qué? Cada una es una enorme colección de protones, neutrones y electrones, y todas estas partículas, ya sea que estén confinadas a una roca o a un conejo, se rigen por las mismas leyes de la física. Entonces, ¿qué ocurre dentro del cuerpo de un conejo que hace que su colección de partículas sea tan profundamente diferente de la colección de partículas que constituyen una roca?

Es el tipo de pregunta que un físico haría. La mayoría de las veces, los físicos son reduccionistas y por lo tanto tienden a buscar debajo de los fenómenos complejos explicaciones que dependen de las propiedades e interacciones de los componentes más simples. Mientras que los biólogos suelen definir la vida por sus actividades básicas, la vida absorbe materias primas para impulsar las funciones autosuficientes, elimina los desechos generados por el proceso y, en los casos más exitosos, se reproduce -Schrödinger buscó una respuesta a "¿Qué es la vida?" que se basara en los fundamentos físicos de la vida.

La atracción del reduccionismo es fuerte. Si pudiéramos identificar lo que anima una colección de partículas, qué magia molecular enciende los fuegos de la vida, daríamos un paso significativo hacia la comprensión del origen de la vida y la ubicuidad, o no, de la vida en el cosmos. Más de medio siglo después, a pesar de los monumentales avances en la física y especialmente en la biología molecular, seguimos buscando variaciones de la pregunta de Schrödinger. Si bien se han producido avances impresionantes en la descomposición de la vida (y de la materia en general) en sus partes constituyentes, los investigadores todavía se enfrentan a la formidable tarea de establecer cómo surge la vida cuando las colecciones de estos constituyentes se disponen en configuraciones particulares. Tal síntesis es un componente esencial del programa reduccionista. Después de todo, cuanto más finamente se examina algo que está vivo, más desafiante es ver que está vivo. Concéntrese en una sola molécula de agua, un átomo de hidrógeno, o un electrón individual, y encontrará que ninguno lleva ninguna marca que delinee si es un constituyente de algo vivo o muerto, de algo animado o inanimado. La vida es reconocible por el comportamiento colectivo, la organización a gran escala, la coordinación general de un enorme número de componentes de partículas, incluso una sola célula contiene más de un billón de átomos. Buscar la comprensión de la vida centrándose en las partículas fundamentales es similar a experimentar una sinfonía de Beethoven instrumento por instrumento, nota por nota.

El mismo Schrödinger enfatizó una versión de este mismo punto en su primera conferencia. Si un cuerpo o un cerebro pudiera verse afectado por el movimiento errante de un solo átomo o de un puñado de átomos, las perspectivas de supervivencia de ese cuerpo o cerebro serían escasas. Para evitar tal sensibilidad, señaló Schrödinger, los cuerpos y cerebros están hechos de grandes colecciones de átomos que pueden mantener su

funcionamiento general altamente coordinado, incluso cuando los átomos individuales se mueven al azar. Así que el objetivo de Schrödinger no era revelar la vida que se cierne sobre un solo átomo, sino construir sobre la comprensión de los átomos la explicación de un físico de cómo una gran colección podría reunirse en algo que vive. En su opinión, esta era una búsqueda expansiva que probablemente requeriría que la ciencia ampliara su base de estructuras conceptuales. De hecho, en un epílogo de *¿Qué es la vida? que tocaba la* conciencia, Schrödinger levantó algunas cejas (y perdió a su primer editor) cuando invocó a los Upanishads hindúes para sugerir que todos somos parte de un "yo eterno omnipresente y omnicomprensivo", y la libertad de voluntad que cada uno de nosotros ejerce refleja nuestros poderes divinos.[6]

Aunque mi opinión sobre el libre albedrío difiere de la de Schrödinger (como veremos en el capítulo 5), comparto su afinidad por un amplio paisaje explicativo. Los misterios profundos requieren claridad a través de una colección de historias anidadas. Ya sean reduccionistas o emergentes, matemáticas o figurativas, científicas o poéticas, reunimos la comprensión más rica al abordar las preguntas desde una gama de perspectivas diferentes.

Historias anidadas

Durante los últimos siglos, la física ha refinado su propia colección de historias anidadas organizadas por las distancias en las que cada historia es relevante. Es fundamental para un enfoque que nosotros los físicos practicamos sin descanso en nuestros estudiantes. Para entender cómo una pelota de béisbol momentáneamente deformada por el golpe ardiente del bate de Mike Trout vuelve a su forma esférica, hay que analizar la estructura molecular de la pelota. Ahí es donde innumerables fuerzas microfísicas empujan la deformación y lanzan la pelota en su camino. Pero esta perspectiva molecular es inútil para entender la trayectoria de la pelota. Los voluminosos datos necesarios para seguir el movimiento de trillones de trillones de moléculas a medida que el balón gira y se eleva por encima de la valla del campo izquierdo serían totalmente incomprensibles. Cuando se trata de la trayectoria, hay que alejar el zoom de las moléculas y examinar el movimiento del balón en su conjunto. Necesitas contar una historia de alto nivel relacionada pero distinta.

El ejemplo ilustra una realización simple pero ampliamente relevante: las preguntas que hacemos determinan las historias que proporcionan las respuestas más útiles. Es una estructura narrativa que aprovecha una de las cualidades más fortuitas de la naturaleza. En cada escala el universo es coherente. Newton no conocía los quarks y los electrones, y aún así si le dieras la velocidad y dirección de una pelota de béisbol al salir del bate de Mike Trout, calcularía su trayectoria mientras duerme. A medida que la física ha progresado desde la época de Newton, hemos podido explorar capas más finas de la estructura, y esto ha llenado significativamente nuestra comprensión. Pero la descripción de cada paso tiene sentido por sí misma. Si no fuera así, si, por ejemplo, entender el movimiento de una pelota de béisbol requiriera entender el comportamiento cuántico de sus partículas, es difícil ver cómo habríamos progresado. Dividir y conquistar ha sido durante mucho tiempo la llamada de la física, una estrategia que ha dado lugar a triunfos ardientes.

Una carga igualmente importante es sintetizar las historias individuales en una narración sin fisuras. Para la física de partículas y campos, tal síntesis fue llevada a su forma más refinada por Ken Wilson, ganando el Premio Nobel de 1982. [7] Wilson desarrolló un procedimiento matemático para analizar los sistemas físicos a lo largo de un rango de diferentes distancias -desde escalas mucho más pequeñas, digamos, que las sondeadas por el Gran Colisionador de Hadrones hasta las distancias atómicas mucho más grandes que han sido accesibles durante más de un siglo- y luego conectar sistemáticamente las historias, aclarando cómo cada una se libera de la carga narrativa a la siguiente a medida que la escala migra más allá de su dominio particular. El método, llamado el *grupo de renormalización,* está en el centro de la física moderna. Muestra cómo el lenguaje, el marco conceptual y las ecuaciones utilizadas para analizar la física en una escala de distancia deben cambiar a medida que cambiamos de enfoque a una escala diferente. Al utilizarlo para desarrollar una colección anidada de descripciones distintas y al delinear cómo cada una informa a aquellos con los que limita, los físicos han extraído predicciones detalladas que han sido confirmadas a través de un gran número de experimentos y observaciones.

Aunque la técnica de Wilson está adaptada a las herramientas matemáticas del físico moderno de partículas de alta energía (la mecánica cuántica y su generalización, la teoría de campo cuántico), la realización general es ampliamente aplicable. Hay muchas maneras de entender el mundo. En la organización tradicional de las ciencias, la física se ocupa de las partículas elementales y sus diversas uniones, la química con los átomos y las moléculas, y la biología con la vida. Esta categorización, que aún existe hoy en día pero que era mucho más prominente cuando yo era estudiante, proporciona una demarcación razonable, aunque burda, de las ciencias por escala. Sin embargo, en tiempos más recientes, cuanto más profundos han sondeado los investigadores, más se han dado cuenta de que es esencial comprender los cruces entre las disciplinas. Las ciencias no están separadas. Y cuando el foco se desplaza de la vida a la vida inteligente, otras disciplinas que se superponen, como el lenguaje, la literatura, la filosofía, la historia, el arte, los mitos, la religión, la psicología, etc., se convierten en centrales para la crónica. Incluso el reduccionista acérrimo se da cuenta de que por muy fatuo que sea explicar la trayectoria de una pelota de béisbol en términos de movimiento molecular, sólo lo sería más invocar una perspectiva tan microscópica para explicar lo que sentía un bateador cuando el lanzador pasaba por su cuerda, la multitud rugía y la bola rápida se acercaba. En cambio, las historias de alto nivel contadas en el lenguaje de la reflexión humana proporcionan una visión mucho mayor. Sin embargo, y esto es clave, estas historias de nivel humano más adecuadas deben ser compatibles con el relato reduccionista. Somos criaturas físicas sujetas a la ley física. Y por lo tanto, poco se gana con los físicos clamando que el suyo es el marco explicativo más fundamental o con los humanistas burlándose de la arrogancia del reduccionismo desenfrenado. Una comprensión refinada se obtiene integrando la historia de cada disciplina en una narrativa de textura fina.[8]

En este capítulo nos comprometemos a adoptar una postura reduccionista, reconociendo que los capítulos posteriores explorarán la vida y la mente desde una sensibilidad humanista complementaria. Aquí discutiremos el origen de los ingredientes atómicos y moleculares necesarios para la vida, el origen de un entorno particular -la tierra y el sol- en

el que esos ingredientes se han mezclado de la manera correcta para que la vida surja y florezca, y exploraremos la profunda unidad de la vida en la tierra examinando algunas de las asombrosas estructuras y procesos microfísicos comunes a todos los seres vivos. [9] Aunque no responderemos a la pregunta sobre el origen de la vida (que sigue siendo un misterio), veremos que toda la vida en la Tierra puede rastrearse hasta una especie ancestral unicelular común, delineando claramente lo que una ciencia del origen de la vida tendrá que explicar en última instancia. Esto nos llevará a examinar la vida desde la perspectiva termodinámica ampliamente aplicable desarrollada en los capítulos anteriores, dejando claro que los seres vivos comparten un profundo parentesco no sólo entre sí sino también con las estrellas y las máquinas de vapor: la vida es un medio más que el universo emplea para liberar el potencial de entropía encerrado en la materia.

Mi objetivo no es ser enciclopédico, sino proporcionar los detalles suficientes para que puedas sentir los ritmos de la naturaleza, los patrones de resonancia que se desarrollan desde el big bang hasta la vida en la tierra.

El origen de los elementos

Moler cualquier cosa previamente viva, hurgar en su compleja maquinaria molecular, y encontrarás una abundancia de los mismos seis tipos de átomos: carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, fósforo y azufre, una colección de elementos que los estudiantes a veces recuerdan con el acrónimo SPONCH (no confundir con la galleta de malvavisco mexicana del mismo nombre). ¿De dónde provienen estos ingredientes atómicos que mantienen la vida? La respuesta que ha surgido representa una de las grandes historias de éxito de la cosmología moderna.

La receta para construir cualquier átomo, por muy complejo que sea, es directa. Unir el número correcto de protones con el número correcto de neutrones, atascarlos en una bola apretada (el núcleo), rodearlos con electrones iguales en número a los de los protones, y poner los electrones en órbitas particulares dictadas por la física cuántica. Eso es todo. El desafío es que, a diferencia de las piezas de Lego, los constituyentes atómicos no se juntan sin más. Se empujan y tiran fuertemente unos a otros, haciendo que el ensamblaje de los núcleos sea una tarea difícil. Los protones, en particular, tienen todos la misma carga eléctrica positiva, por lo que se necesita una enorme presión y temperatura para que atraviesen su mutua repulsión electromagnética y se acerquen lo suficiente para que la fuerte fuerza nuclear domine, encerrándolos en un poderoso abrazo subatómico.

Las feroces condiciones inmediatamente después del big bang fueron más extremas que cualquier otra cosa encontrada en cualquier otro lugar en cualquier momento desde entonces, y por lo tanto parecería un ambiente propicio para superar la repulsión electromagnética y ensamblar los núcleos atómicos. Dentro de una fenomenalmente densa y energética mezcla de protones y neutrones en colisión, se podría suponer que se formarían naturalmente aglomeraciones, sintetizando la tabla periódica una especie atómica tras otra. De hecho, eso es lo que George Gamow (un físico soviético cuyo primer intento de desertar, en 1932, implicó remar en un kayak repleto de café y chocolate a través del

Mar Negro) y su estudiante de posgrado Ralph Alpher sugirieron a finales de la década de 1940.

Tenían parcialmente razón. Una trampa, de la que se dieron cuenta, es que en los primeros momentos la temperatura del universo era demasiado alta. El espacio estaba inundado de fotones extraordinariamente energéticos que habrían destrozado cualquier unión incipiente de protones y neutrones. Pero, como también se dieron cuenta, sólo un minuto y medio más tarde - mucho tiempo si se considera la velocidad del torbellino a la que se desarrolló el universo primitivo - la situación cambió. Para entonces, la temperatura bajó lo suficiente como para que las energías típicas de los fotones ya no abrumaran la fuerte fuerza nuclear, permitiendo finalmente que las uniones de protones y neutrones persistieran.

La segunda trampa, que quedó clara más tarde, es que construir átomos complejos es un proceso intrincado que requiere tiempo. Requiere una serie de pasos muy específicos en los que los números prescritos de protones y neutrones se fusionan en varios grumos, que luego necesitan encontrar fortuitamente grumos complementarios particulares, fusionarse con ellos también, y así sucesivamente. Como la receta de un gourmet, el orden en que los ingredientes se combinan es esencial. Y lo que hace que el proceso sea particularmente complicado es que algunos grumos intermedios son inestables, lo que significa que después de formarse tienden a desintegrarse rápidamente, interrumpiendo las preparaciones culinarias y ralentizando la síntesis atómica. Este obstáculo es muy importante porque la constante disminución de la temperatura y la densidad a medida que el universo primitivo se expande rápidamente implica que la ventana de oportunidad para la fusión se cierra rápidamente. Aproximadamente diez minutos después de la creación, la temperatura y la densidad caen por debajo del umbral requerido para los procesos nucleares.[10]

Cuando estas consideraciones se hacen cuantitativas, como las inició Alpher en su tesis doctoral y las perfeccionaron muchos investigadores desde entonces, encontramos que en el período inmediatamente posterior al big bang sólo se habrían sintetizado las primeras pocas especies atómicas. Las matemáticas nos permiten calcular sus abundancias relativas: alrededor del 75 por ciento de hidrógeno (un protón), 25 por ciento de helio (dos protones, dos neutrones), y trazas de deuterio (una forma pesada de hidrógeno, con un protón y un neutrón), helio-3 (una forma ligera de helio con dos protones y un neutrón), y litio (tres protones, cuatro neutrones). [11] Las detalladas observaciones astronómicas de las abundancias atómicas han confirmado que estas proporciones son puntuales, un triunfo de las matemáticas y la física en la iluminación de los procesos detallados que ocurrieron a pocos minutos del big bang.

¿Qué pasa con los átomos más complejos, como los esenciales para la vida? Las sugerencias para su origen se remontan a la década de 1920. El astrónomo británico Sir Arthur Eddington (que cuando se le preguntó cómo era estar entre sólo tres personas que comprendían la relatividad general de Einstein, respondió célebremente: "Estoy tratando de pensar quién es la tercera persona") dio con la idea correcta: el abrasador interior de las estrellas podría proporcionar Crock-Pots cósmicos para cocer lentamente especies atómicas más complejas. La propuesta pasó por las manos de muchos físicos brillantes, incluidos los

del premio Nobel Hans Bethe (mi primera oficina de la facultad estaba al lado de la suya, y podía ajustar mi reloj por su totalmente fiable a las cuatro de la tarde. exuberante estornudo) y, quizás más consecuentemente, los de Fred Hoyle (quien en un programa de radio de la BBC en 1949 se refirió despectivamente a que el universo fue creado en "un big bang", acuñando sin querer uno de los apodos más concisos de la ciencia [12]), lo que convirtió la sugerencia en un mecanismo físico maduro y predictivo.

En comparación con el vertiginoso ritmo de cambio que se produjo inmediatamente después del big bang, las estrellas proporcionan entornos estables que pueden persistir durante millones, si no miles de millones de años. La inestabilidad de determinados grumos intermedios también ralentiza el proceso de fusión en las estrellas, pero cuando se tiene tiempo para matar aún se puede hacer el trabajo. Así que a diferencia de la situación con el big bang, después de que el hidrógeno se fusiona con el helio la síntesis nuclear en las estrellas está lejos de terminar. Las estrellas que son suficientemente masivas continuarán aplastando los núcleos, forzándolos a fusionarse en los átomos más complejos de la tabla periódica, mientras producen calor y luz sustancial en el proceso. Por ejemplo, una estrella con veinte veces la masa del sol pasará sus primeros ocho millones de años fusionando hidrógeno en helio, y luego dedicará su siguiente millón de años a fusionar helio en carbono y oxígeno. A partir de ahí, con su temperatura central cada vez más alta, la cinta transportadora se acelera continuamente: la estrella tarda unos mil años en quemar su almacén de carbono, fusionándolo en sodio y neón; durante los siguientes seis meses, la fusión adicional produce magnesio; en un mes más azufre y silicio; y luego, en apenas diez días, la fusión quema los átomos restantes, produciendo hierro.[13]

Nos detenemos en el hierro, por una buena razón. De todas las especies atómicas, los protones y neutrones del hierro están unidos más estrechamente. Esto es importante. Si intentas construir especies atómicas aún más pesadas atiborrándote de protones y neutrones adicionales, verás que los núcleos de hierro tienen poco interés en participar. El abrazo del oso nuclear que sujeta los 26 protones y los 30 neutrones del hierro ya ha exprimido y liberado tanta energía como es físicamente posible. Para añadir protones y neutrones se necesitaría una entrada neta, no una salida de energía. Como resultado, cuando llegamos al hierro, la producción ordenada de la fusión estelar de átomos más grandes y complejos, con la consiguiente liberación de calor y luz, se detiene. Como la ceniza que ha caído en el hogar de la chimenea, el hierro no puede ser quemado más.

¿Qué es entonces de todas las especies atómicas con núcleos aún más grandes, incluyendo elementos utilitarios como el cobre, el mercurio y el níquel; favoritos sentimentales como la plata, el oro y el platino; y pesos pesados exóticos como el radio, el uranio y el plutonio?

Los científicos han identificado dos fuentes para estos elementos. Cuando el núcleo de una estrella es mayormente de hierro, las reacciones de fusión ya no generan la energía de empuje hacia afuera y la presión necesaria para contrarrestar la atracción hacia adentro de la gravedad. La estrella comienza a colapsar. Si la estrella es lo suficientemente masiva, este colapso se acelera en una implosión tan poderosa que la temperatura del núcleo se dispara; el material en implosión rebota en el núcleo y desencadena una espectacular onda expansiva que sale al exterior. Y mientras la onda de choque retumba desde el núcleo hacia

la superficie de la estrella, comprime los núcleos que encuentra con tal furia que se forman un montón de grandes aglomeraciones nucleares. En la vorágine del movimiento caótico de las partículas, todos los elementos más pesados de la tabla periódica pueden ser sintetizados, y cuando la onda de choque finalmente alcanza la superficie de la estrella, hace estallar la rica mezcla atómica en el espacio.

Una segunda fuente de elementos pesados son las violentas colisiones entre estrellas de neutrones, cuerpos celestes producidos en la agonía de las estrellas cuya masa es aproximadamente de diez a treinta veces la del sol. Esas estrellas de neutrones están hechas en su mayoría de neutrones -partículas camaleónicas que pueden transformarse en protones-, lo que les permite construir núcleos atómicos, ya que tenemos una profusión de las materias primas adecuadas. Un obstáculo, sin embargo, es que para formar núcleos atómicos los neutrones necesitan liberarse del poderoso agarre gravitacional de la estrella. Ahí es donde una colisión entre estrellas de neutrones resulta útil. El impacto puede lanzar columnas de neutrones que, al no tener carga eléctrica y por tanto no experimentar repulsión electromagnética, se unen más fácilmente en grupos. Después de que algunos de estos neutrones activan el interruptor camaleónico y se convierten en protones (liberando electrones y antinutrinos en el proceso), adquirimos un suministro de núcleos atómicos complejos. En 2017, las colisiones de estrellas de neutrones pasaron de ser un juego teórico a un hecho observacional cuando los científicos detectaron las ondas gravitatorias que dichas colisiones generan (que siguieron a las primeras ondas gravitatorias detectadas, que se produjeron por la colisión de dos agujeros negros). Una oleada de análisis ha determinado que las colisiones de estrellas de neutrones producen elementos más pesados de manera más eficiente y abundante que las explosiones de supernovas, y así puede ser que la mayoría de los elementos pesados del universo se hayan producido a través de estas colisiones astrofísicas.

Fundidas en estrellas y eyectadas en explosiones de supernovas, o expulsadas por colisiones estelares y amalgamadas en plumas de partículas, un surtido de especies atómicas flotan a través del espacio, donde se arremolinan y se fusionan en grandes nubes de gas, que con el tiempo se agrupan de nuevo en estrellas y planetas, y en última instancia en nosotros. Tal es el origen de los ingredientes que constituyen todo lo que se ha encontrado.

El origen del sistema solar

Con poco más de cuatro mil quinientos millones de años, el sol es un recién llegado cósmico. No estaba entre la primera generación de estrellas del universo. Vimos en el capítulo 3 que esos pioneros estelares se originaron en las variaciones cuánticas de la densidad de la materia y la energía que se extendieron por el espacio por la expansión inflacionaria. Las simulaciones por ordenador de estos procesos revelan que las primeras estrellas se encendieron unos cien millones de años después del big bang, con una entrada en el escenario cósmico que era cualquier cosa menos delicada. Las primeras estrellas eran probablemente gigantescas, cientos o incluso miles de veces la masa del sol, ardiendo con tal intensidad que rápidamente se extinguieron. Las más pesadas terminaron sus vidas en una implosión gravitacional tan enfática que colapsaron hasta llegar a los agujeros negros,

configuraciones extremas de materia que serán un foco principal más adelante en nuestro viaje. Las estrellas primitivas menos masivas terminaron sus vidas con una ardiente explosión de supernova que, más allá de sembrar el espacio con átomos complejos, inició la siguiente ronda de formación estelar. Al igual que una onda de choque de supernova que atraviesa una estrella fusiona con fuerza sus componentes atómicos, una onda de choque que atraviesa el espacio comprime las nubes de los ingredientes moleculares que encuentra. Y como las regiones comprimidas son más densas, ejercen una mayor atracción gravitatoria sobre sus alrededores, atrayendo más componentes de partículas y provocando una nueva ronda de bolas de nieve gravitatorias en el camino hacia la siguiente generación de estrellas.

Basándose en la composición del sol -las cantidades de varios elementos pesados que contiene ahora, determinadas por mediciones espectroscópicas- los físicos solares creen que el sol es un nieto de las primeras estrellas del universo, una llegada de tercera generación. Pero hay mucha incertidumbre sobre dónde se formó el sol originalmente. Un candidato que ha sido investigado es una región conocida como Messier 67, a unos tres mil años luz de distancia, que contiene un cúmulo de estrellas cuyas composiciones químicas parecen similares a las del sol, lo que sugiere un parecido familiar cercano. El desafío, aún no resuelto, es explicar cómo el sol y los planetas del sistema solar (o el disco protoplanetario a partir del cual se formarían los planetas posteriormente) habrían sido expulsados de esa lejana guardería estelar y migrado aquí. Algunos estudios de las trayectorias potenciales concluyen que no hay virtualmente ninguna posibilidad de que Messier 67 sea el lugar de nacimiento del sol, mientras que otros, invocando varias suposiciones modificadas, han dado resultados más alentadores.[14]

Lo que podemos decir con más confianza es que hace unos 4.700 millones de años una onda expansiva de supernova probablemente atravesó una nube que contenía hidrógeno, helio y pequeñas cantidades de átomos más complejos, comprimiendo parte de la nube, que, al ser ahora más densa que sus alrededores, ejerció una mayor atracción gravitatoria y así comenzó a atraer material hacia el interior. Durante los siguientes cientos de miles de años, esta región de la nube de gas continuó contrayéndose, rotando lentamente al principio y luego más rápidamente, como una graciosa patinadora que tira de sus brazos mientras gira. Y así como el patinador que gira experimenta un tirón hacia afuera (que desparrama cualquier franja suelta del traje del patinador), también lo hizo la nube giratoria, que se extendió y aplanó sus regiones externas en un disco giratorio, que rodeó una región esférica más pequeña en el centro. Durante los siguientes cincuenta a cien millones de años, la nube de gas realizó una lenta y constante interpretación de los dos pasos gravitatorios entrópicos discutidos en el capítulo 3: La fuerza gravitatoria comprimió el núcleo esférico, que se hizo cada vez más caliente y denso, mientras que el material circundante se enfriaba y se adelgazaba. La entropía del núcleo disminuyó; la entropía de los alrededores lo compensó con un aumento más que compensatorio. En última instancia, la temperatura y la densidad del núcleo cruzaron el umbral para encender la fusión nuclear.

El sol nació.

Durante los siguientes millones de años, el detrito que quedó de la formación del sol, que ascendía a unas pocas décimas de porcentaje del disco giratorio original, se fusionó a través de numerosos casos de bolas de nieve gravitacionales en los planetas del sistema solar. Sustancias más ligeras y volátiles -como el hidrógeno y el helio, así como el metano, el amoníaco y el agua-, que se verían perturbadas por la intensa radiación del sol, se acumularon más abundantemente en las regiones exteriores más frías del sistema solar, formando los gigantes gaseosos, Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno.

Los componentes más pesados y robustos, como el hierro, el níquel y el aluminio, que resistieron mejor el ambiente más caliente cerca del sol, se consolidaron en los planetas interiores rocosos más pequeños, Mercurio, Venus, la Tierra y Marte. Siendo mucho menos masivos que el sol, los planetas son capaces de soportar su modesto peso gracias a la resistencia intrínseca de sus propios átomos a la compresión. Las temperaturas y presiones internas de los planetas aumentan, pero no se acercan a los niveles necesarios para que se produzca la fusión nuclear, lo que da lugar a los entornos comparativamente templados por los que la vida -seguramente nuestra forma y posiblemente toda la vida en el universo- tiene una gratitud significativa.

La joven Tierra

Los primeros quinientos millones de años de la Tierra se conocen como el período Hadeano, invocando al dios griego del inframundo para connotar una era infernal de volcanes en erupción, brotes de roca fundida y gruesos vapores nocivos de azufre y cianuro. Pero algunos científicos ahora sospechan que como abanderado de la joven Tierra, Poseidón puede ser el dios elegido. El aún debatido cambio del mar se basa en pruebas no más sustanciales que las motas de polvo. Aunque carecemos de muestras de rocas de esa época temprana, los investigadores han identificado antiguas motas translúcidas -llamadas cristales de *circonio- que* se formaron cuando la lava fundida de la Tierra temprana se enfrió y solidificó. Los cristales de circón están demostrando ser fundamentales para comprender el desarrollo temprano de la Tierra porque no sólo son virtualmente indestructibles, sobreviviendo a miles de millones de años de maltrato geológico, sino que también actúan como cápsulas del tiempo en miniatura. Cuando se forman, los cristales de zirconio atrapan muestras moleculares del medio ambiente, que podemos marcar con el tiempo mediante una datación radiactiva estándar. Analizando de cerca las impurezas en los cristales de zirconio, tomamos muestras de las condiciones de la tierra arcaica.

Un hallazgo en Australia Occidental encontró cristales de circonio que datan de hace 4.400 millones de años, sólo un par de cientos de millones de años después de que se formaran la Tierra y el sistema solar. Analizando su composición detallada, los investigadores han sugerido que las condiciones de la antigüedad pueden haber sido mucho más agradables de lo que se pensaba. La Tierra primitiva puede haber sido un mundo de aguas relativamente tranquilas, con pequeñas masas de tierra que salpican una superficie cubierta en su mayor parte por el océano.[15]

Eso no quiere decir que la historia de la Tierra no haya tenido sus momentos de dramatización. Aproximadamente de cincuenta a cien millones de años después de su nacimiento, la Tierra probablemente chocó con un planeta del tamaño de Marte llamado Theia, que habría vaporizado la corteza terrestre, borrado a Theia y lanzado una nube de polvo y gas a miles de kilómetros en el espacio. Con el tiempo, esa nube se habría agrupado gravitacionalmente para formar la Luna, uno de los mayores satélites planetarios del sistema solar y un recordatorio nocturno de ese violento encuentro. Otro recordatorio es proporcionado por las estaciones. Experimentamos veranos calurosos e inviernos fríos porque el eje inclinado de la Tierra afecta el ángulo de la luz solar entrante, siendo el verano un período de rayos directos y el invierno un período de rayos oblicuos. El choque

con Theia es la causa probable de la inclinación de la Tierra. Y aunque menos sensacional que una colisión planetaria, tanto la Tierra como la Luna soportaron períodos de importantes golpes de meteoritos más pequeños. La falta de vientos erosivos en la luna y su corteza estática han preservado las cicatrices, pero el golpe de la Tierra, menos visible ahora, fue igual de severo. Algunos impactos tempranos pueden haber vaporizado parcial o incluso totalmente toda el agua de la superficie de la Tierra. A pesar de ello, los archivos del circón proporcionan pruebas de que dentro de unos pocos cientos de millones de años de su formación, la tierra puede haberse enfriado lo suficiente como para que el vapor atmosférico lloviera, llenara los océanos y diera lugar a un terreno no tan diferente de la tierra que conocemos ahora. Al menos, esa es una conclusión a la que se llegó al leer los cristales.

La duración necesaria para que la Tierra se calme y tenga abundancia de agua -ya sea cientos de millones de años o mucho más- es objeto de un intenso debate, ya que habla directamente de la cuestión de cuándo surgió la vida por primera vez en nuestra historia geológica. Aunque es demasiado fuerte decir que donde hay agua líquida hay vida, podemos decir con cierta confianza que en ausencia de agua líquida hay ausencia de vida, al menos el tipo de vida con el que estamos familiarizados.

Veamos por qué.

La vida, la física cuántica y el agua

El agua es una de las sustancias más conocidas de la naturaleza, pero también una de las más importantes. Su composición molecular, H2O, se ha convertido para la química en lo que la *E = mc2* de Einstein es para la física, la fórmula más famosa del sujeto. Al desarrollar esa fórmula, obtenemos una visión de las propiedades distintivas del agua y desarrollamos algunas de las ideas clave en el programa de Schrödinger para entender la vida a nivel de la física y la química.

A mediados de la década de 1920, muchos de los principales físicos del mundo podían sentir que el orden aceptado estaba al borde de un trastorno radical. Las ideas newtonianas, cuyas predicciones sobre el movimiento de los planetas en órbita y las rocas voladoras habían establecido durante siglos el estándar de oro de la precisión, estaban fallando miserablemente cuando se aplicaban a partículas diminutas como los electrones. A medida que los datos rebeldes surgían del micromundo, los tranquilos mares del entendimiento newtoniano se volvieron turbulentos. Los físicos se encontraron rápidamente luchando por mantenerse a flote. El lamento de Werner Heisenberg, murmurado mientras caminaba sin rumbo a través de un parque vacío en Copenhague después de una agotadora noche de intensos cálculos con Niels Bohr, resumía bien la situación: "¿Puede la naturaleza ser tan absurda como nos pareció en estos experimentos atómicos?" [16] La respuesta, un rotundo sí, vino en 1926 de un modesto físico alemán, Max Born, que rompió el atolladero conceptual introduciendo un paradigma cuántico radicalmente nuevo. Argumentó que un electrón (o cualquier partícula) sólo puede describirse en términos de la *probabilidad de* que se encuentre en un lugar determinado. De un solo golpe, el conocido mundo newtoniano en el que los objetos siempre tienen posiciones definidas dio paso a una realidad cuántica en la

que una partícula podría estar aquí o allá o en algún otro lugar completamente distinto. Y lejos de fracasar, la incertidumbre inherente a un esquema probabilístico reveló un rasgo intrínseco de la realidad cuántica largamente pasado por alto por el profundamente perspicaz pero demostrablemente tosco marco newtoniano. Newton basó sus ecuaciones en el mundo que podía ver. Un par de cientos de años más tarde, aprendimos que hay una realidad inesperada más allá del alcance de nuestras frágiles percepciones humanas.

La propuesta de Born llegó con precisión matemática. [17] Explicó que una ecuación que Schrödinger había publicado unos meses antes podía ser usada para predecir las probabilidades cuánticas. Esto era una novedad para Schrödinger, y para todos los demás también. Pero a medida que los científicos seguían la directiva de Born, descubrieron que las matemáticas funcionaban. Espectacularmente. Los datos que anteriormente habían sido subsumidos bajo reglas ad hoc o que se habían resistido a la explicación por completo podían finalmente ser comprendidos a través de análisis matemáticos sistemáticos.

Cuando se aplica a los átomos, la perspectiva cuántica echa por la borda el antiguo "modelo del sistema solar", que imaginaba a los electrones en órbita alrededor del núcleo de la misma manera que los planetas orbitan el sol. En su lugar, la mecánica cuántica prevé un electrón como una nube borrosa que rodea el núcleo cuya densidad en cualquier lugar dado indica la probabilidad de que el electrón se encuentre allí. Es improbable que un electrón se encuentre donde su nube de probabilidad es delgada, y es probable que se encuentre donde su nube de probabilidad es gruesa.

La ecuación de Schrödinger hace esta descripción matemáticamente explícita, determinando el perfil de forma y densidad de la nube de probabilidad de un electrón, así como estipulando - y para nuestra discusión actual, esto es clave - exactamente cuántos de los electrones del átomo puede acomodar cada una de tales nubes. [18] Los detalles se vuelven rápidamente técnicos, pero para comprender las características esenciales, piense en el núcleo de un átomo como un escenario central y sus electrones como una audiencia que observa la acción desde los asientos de las gradas circundantes, dispuestos para el teatro en la ronda. En este "teatro cuántico", las matemáticas de Schrödinger aplicadas a los átomos dictan cómo el público de electrones llena los asientos.

Como es de esperar de su experiencia subiendo escaleras en un teatro real, cuanto más alto el nivel, más energía necesita un electrón para alcanzarlo. Así que cuando un átomo está tan tranquilo como puede estar, en su configuración de menor energía, sus electrones constituyen la más ordenada de las audiencias, poblando un nivel más alto sólo si los niveles inferiores están completamente ocupados. Con el átomo poseyendo una energía mínima, ningún electrón sube más alto de lo que debe. ¿Cuántos electrones puede contener un nivel determinado? Las matemáticas de Schrödinger proporcionan la respuesta, un código universal de fuego que se aplica a todos los teatros cuánticos: como máximo se permiten dos electrones en el nivel uno, ocho electrones en el nivel dos, dieciocho en el nivel tres, y así sucesivamente, según lo especificado por la ecuación. Si la energía de un átomo es bombeada, por ejemplo, por un potente láser, algunos de sus electrones pueden estar lo suficientemente agitados como para saltar a un nivel superior, pero esta exuberancia será de corta duración. Estos electrones excitados rápidamente vuelven a su nivel original,

emitiendo energía (arrastrada por los fotones) y devolviendo al átomo a su configuración más tranquila.[19]

Las matemáticas también revelan otra peculiaridad, una especie de TOC atómico que es el principal impulsor de las reacciones químicas en todo el cosmos. Los átomos tienen una aversión a los niveles que están sólo parcialmente llenos. ¿Niveles que están vacíos? Sí. ¿Niveles que están llenos? Sí. ¿Pero ocupación parcial? Eso hace que los átomos suban por la pared. Algunos átomos tienen suerte, al estar dotados del número justo de electrones para lograr la ocupación completa por sí mismos. El helio contiene dos electrones, para equilibrar la carga eléctrica de sus dos protones, y felizmente llenan el primer nivel. El neón tiene diez electrones para equilibrar la carga eléctrica de sus diez protones, y felizmente llenan su primer nivel, que aloja dos, y su segundo nivel, que aloja los ocho restantes. Pero para la mayoría de los átomos, el número de electrones necesarios para equilibrar el número de protones no llena un conjunto completo de niveles.[20]

¿Y qué hacen?

Hacen trueques con otras especies atómicas. Si eres un átomo con un nivel superior que necesita dos electrones más y yo soy un átomo con un nivel superior ocupado por dos electrones, entonces si te dono dos electrones, cada uno de nosotros se rascará la picazón de ocupación del otro: la donación da como resultado que cada uno de nosotros tenga niveles completamente completos. Note también que al aceptar mis electrones usted adquirirá una carga neta negativa, y al donar mis electrones adquiriré una carga neta positiva y como las cargas opuestas se atraen, usted y yo nos abrazaremos para formar una molécula eléctricamente neutra. Alternativamente, si tú y yo, por ejemplo, necesitamos un electrón más para llenar nuestros niveles superiores, hay un tipo de acuerdo diferente que podemos hacer: podemos donar cada uno un electrón a una piscina comunitaria que compartimos, rascándonos de nuevo el picor de la ocupación del otro, y - a través del vínculo de nuestros electrones compartidos - combinándonos de nuevo en una molécula eléctricamente neutra. Estos procesos, que llenan los niveles de electrones al unir los átomos, son lo que entendemos por reacciones químicas. Proporcionan la plantilla para tales reacciones aquí en la Tierra, en los sistemas vivos y en todo el universo.

El agua es un caso importante. El oxígeno contiene ocho electrones, dos en el nivel uno y seis en el nivel dos. El oxígeno, por lo tanto, se esfuerza por dos electrones más, buscando llenar su segundo nivel hasta la máxima ocupación de ocho. Una fuente fácilmente disponible es el hidrógeno. Cada átomo de hidrógeno tiene un solo electrón, que cuelga solo y que se mueve en el primer nivel. Si un átomo de hidrógeno tiene la oportunidad de llenar este nivel con un electrón más, lo hará felizmente. Así que el hidrógeno y el oxígeno acuerdan compartir un par de electrones comunes, satisfaciendo plenamente al hidrógeno y acercando al oxígeno un electrón a la felicidad orbital. Incluyendo un segundo átomo de hidrógeno que comparte de forma similar un par de electrones comunes con el oxígeno, es un éxtasis para todos. El compartir estos electrones une el átomo de oxígeno a los dos átomos de hidrógeno, dando lugar a una molécula de agua, H2O.

La geometría de esta unión tiene implicaciones de gran alcance. El interatómico empuja y tira de todas las moléculas de agua en una amplia V, con el oxígeno en el vértice y cada

hidrógeno encaramado en una de las puntas superiores de la letra. Aunque el H2O no tiene carga eléctrica neta, debido a que el oxígeno es tan maniático para llenar sus niveles orbitales, acapara los electrones compartidos, lo que resulta en una distribución de la carga a través de la molécula que está desbalanceada. El vértice de la molécula, el hogar del oxígeno, tiene una carga neta negativa, mientras que las dos puntas superiores, donde habitan los hidrógenos, tienen una carga neta positiva.

La distribución de la carga eléctrica a través de una molécula de agua podría parecer un detalle esotérico. Pero no lo es. Demuestra ser esencial para el surgimiento de la vida. Debido a la distribución sesgada de la carga del agua, puede disolver casi todo. El vértice de oxígeno cargado negativamente se aferra a cualquier cosa con una ligera carga positiva; las puntas de hidrógeno cargado positivamente se aferran a cualquier cosa con una ligera carga negativa. En tándem, los dos extremos de una molécula de agua actúan como garras cargadas que separan casi todo lo que esté sumergido durante un tiempo suficiente.

La sal de mesa es el ejemplo más familiar. Compuesta por un átomo de sodio unido a un átomo de cloro, una molécula de sal de mesa tiene una ligera carga positiva cerca del sodio (que dona un electrón al cloro) y una ligera carga negativa cerca del cloro (que acepta un electrón del sodio). Si se deja caer sal en el agua, el lado del oxígeno del H2O (con carga negativa) se agarra al sodio (con carga positiva), mientras que el lado del hidrógeno del H2O (con carga positiva) se agarra al cloro (con carga negativa), rompiendo las moléculas de sal y disolviéndolas en la solución. Y lo que es cierto para la sal también lo es para muchas otras sustancias. Los detalles varían, pero la disposición de la carga asimétrica del agua la convierte en un disolvente extraordinario. Lávese las manos, incluso sin jabón, y la polaridad eléctrica del agua trabajará duro, disolviendo la materia extraña y llevándosela.

Más allá de su utilidad en la higiene personal, la capacidad del agua para agarrar e ingerir sustancias es indispensable para la vida. El interior de las células es un laboratorio químico en miniatura cuyo funcionamiento requiere el rápido movimiento de una vasta colección de ingredientes: nutrientes que entran, desechos que salen, mezcla de productos químicos para sintetizar sustancias necesarias para la función celular, y así sucesivamente. El agua hace esto posible. El agua, que constituye alrededor del 70 por ciento de la masa de una célula, es el fluido de transporte de la vida. El premio Nobel Albert Szent-Györgyi lo resumió elocuentemente: "El agua es la materia y la matriz de la vida, la madre y el medio. No hay vida sin agua. La vida pudo abandonar el océano cuando aprendió a cultivar una piel, una bolsa en la que llevar el agua. Seguimos viviendo en el agua, teniendo el agua ahora dentro". [21] Como poesía, esta es una oda graciosa al agua y a la vida. Como ciencia, no hay todavía ningún argumento para establecer la validez universal de la declaración, pero no conocemos ninguna forma de vida que desafíe la necesidad del agua.

La unidad de la vida

Habiendo estudiado la síntesis de los átomos simples y complejos, el origen del sol y la tierra, la naturaleza de las reacciones químicas y la necesidad del agua, estamos ahora

equipados para volvernos hacia la vida misma. Aunque parezca natural comenzar con la génesis de la vida, este tema, aún no resuelto, se aborda mejor después de explorar las cualidades moleculares por excelencia de la vida misma. Y para alguien como yo, que ha pasado los últimos treinta años persiguiendo una teoría unificada de las fuerzas fundamentales de la naturaleza, tal exploración revela una asombrosa unidad biológica. No conocemos el número exacto de especies distintas en la Tierra, desde microbios hasta manatíes, pero los estudios han proporcionado estimaciones que van desde un mínimo de millones hasta un máximo de billones. Cualquiera que sea el número exacto, es enorme. La riqueza de las diferentes especies, sin embargo, contradice la naturaleza singular del funcionamiento interno de la vida.

Examine el tejido vivo lo suficientemente cerca y encontrará los "cuantos" de la vida, las células, las unidades más pequeñas de tejido que identificamos como vivas. Independientemente de su origen, las células comparten tantos rasgos que el ojo no entrenado que examina los especímenes individuales sería difícil de distinguir el ratón del mastín, la tortuga de la tarántula, la mosca doméstica del humano. Eso es notable. Seguramente nuestras células deben mostrar una obvia y significativa huella distintiva. Sin embargo, no lo hacen. La razón, establecida durante las últimas décadas, es que toda la vida compleja multicelular descendió de la misma especie ancestral unicelular. Las células son similares porque sus linajes irradian desde el mismo punto de partida.[22]

Esa es una realización reveladora. Con sus copiosas encarnaciones, la vida podría haber tenido muchos orígenes distintos. Rastrear el linaje del molusco marino hasta el pasado podría haber revelado un punto de partida, mientras que hacer lo mismo con los wombats o las orquídeas podría haber revelado otros. Pero la evidencia sugiere fuertemente que al buscar el origen de la vida, los linajes convergen en un ancestro común. Dos ubicuas cualidades de la vida hacen el caso aún más convincente. Cada una ilustra los profundos puntos comunes compartidos por todo lo que vive. La primera, y más familiar, se refiere a *la información:* cómo las células codifican y utilizan la información que dirige las funciones de mantenimiento de la vida. El segundo, igualmente importante pero menos celebrado, se refiere a la *energía:* cómo las células aprovechan, almacenan y despliegan la energía necesaria para llevar a cabo las funciones de mantenimiento de la vida. En ambos veremos que, claramente, a lo largo de la espectacular amplitud de la vida en la Tierra los procesos detallados son idénticos.

La Unidad de Información de la Vida

Una forma de reconocer que un conejo está vivo es verlo moverse. Una roca también puede moverse, por supuesto. Una fuerte corriente de río puede empujarla río abajo o una erupción volcánica puede lanzarla hacia el cielo. La diferencia es que el movimiento de la roca se puede entender completamente, incluso predecir, basado en las fuerzas externas que actúan sobre ella. Cuéntame lo suficiente sobre la corriente o la erupción y podré hacer un trabajo razonablemente bueno para determinar lo que sucederá. Predecir el movimiento del conejo es más difícil. La actividad dentro de lo que Schrödinger llamó el "límite espacial" del conejo, su actividad interna, es un factor decisivo en su locomoción. El conejo mueve la nariz, gira la cabeza, golpea las patas, y todo esto hace que parezca tener voluntad propia.

Si el conejo o cualquier forma de vida (incluyéndonos a nosotros) tiene realmente una voluntad tan autónoma es una cuestión que se ha debatido durante siglos, y una que abordaremos en el próximo capítulo, así que no nos atasquemos con ella aquí. Por ahora, todos podemos estar de acuerdo en que mientras que la actividad dentro de la roca no tiene prácticamente ninguna consecuencia para el movimiento que observamos, los movimientos coordinados, complejos y autodirigidos del conejo nos indican que está vivo.

No es un diagnóstico infalible. Los sistemas automatizados pueden ejecutar movimientos de un tipo muy similar, y a medida que el progreso tecnológico continúe, la capacidad de emular la vida será aún más aguda. Pero eso sólo sirve para subrayar el punto más importante: el movimiento del tipo que estamos considerando surge de una interacción entre la información y la ejecución, entre lo que podríamos llamar software y hardware. Para un sistema automatizado, la descripción es literal. Los drones, los coches autopropulsados, los Roombas, etc., se rigen por un software que toma los datos ambientales como entrada y como salida determina una respuesta ejecutada por el hardware de a bordo, desde las alas hasta los rotores y las ruedas. Para un conejo, la descripción es una metáfora. Sin embargo, el paradigma software-hardware es también una forma particularmente útil de pensar sobre la vida. El conejo acumula datos sensoriales del entorno, los pasa por un "ordenador neuronal" (su cerebro), que envía señales cargadas de información por las vías nerviosas -comer trébol, saltar sobre ramas caídas, y así sucesivamente- generando acciones físicas. El movimiento del conejo surge del procesamiento interno y la transmisión de un complejo conjunto de instrucciones que fluye a través de su estructura física: el software biológico que impulsa el hardware biológico. Tales procesos están totalmente ausentes en una roca.

Si nos sumergimos en la profundidad de una sola célula del conejo nos encontramos con un conjunto de ideas similares que se desarrollan a menor escala. La gran mayoría de las funciones de una célula son ejecutadas por proteínas, grandes moléculas que catalizan y regulan las reacciones químicas, transportan sustancias esenciales y controlan propiedades detalladas como la forma y el movimiento celular. Las proteínas se construyen a partir de combinaciones de veinte subunidades más pequeñas, los aminoácidos, *de forma* similar a como las palabras inglesas surgen de varias combinaciones de veintiséis letras. Y así como las palabras sensatas requieren que las letras estén dispuestas en órdenes específicos, las proteínas utilizables requieren que los aminoácidos estén vinculados en secuencias específicas. Si tal ensamblaje se dejara al azar, la probabilidad de que los aminoácidos necesarios se chocaran entre sí de la manera correcta para construir una proteína en particular sería casi nula. La gran cantidad de formas en que veinte aminoácidos distintos pueden unirse en una larga cadena lo hace evidente: para una cadena con ciento cincuenta aminoácidos (una pequeña proteína), hay alrededor de ^{10195} arreglos diferentes, mucho más grandes que el número de partículas en el universo observable. De la misma manera que el proverbial equipo de monos que escribieron letras al azar durante décadas no logrará explicar más que "Ser o no ser", el azar no logrará crear las proteínas específicas necesarias para la vida.

En cambio, la síntesis de proteínas complejas requiere un conjunto de instrucciones que explican un proceso paso a paso: enganchar este aminoácido a ese, luego a este, seguido de

ese, y así sucesivamente. Es decir, la síntesis de proteínas requiere un software celular. Y dentro de cada célula existen tales instrucciones. Están codificadas por el ADN, el químico que mantiene la vida cuya arquitectura geométrica fue descubierta por Watson y Crick.

Cada molécula de ADN está configurada en la famosa espiral de la doble hélice, una larga escalera giratoria cuyos peldaños consisten en pares de puntales, moléculas más cortas llamadas bases, usualmente denotadas como A, T, G y C (los nombres técnicos no nos importarán, pero estos significan adenina, timina, guanina y citosina). Los miembros de una especie determinada comparten en su mayoría la misma secuencia de letras. En el caso de los humanos, la secuencia de ADN tiene unos tres mil millones de letras, y su secuencia difiere de la de Albert Einstein o Marie Curie o William Shakespeare o cualquier otra persona en menos de un cuarto de porcentaje, aproximadamente una letra de cada quinientos. [23] Pero mientras se deleita en el brillo de poseer un genoma tan similar al de cualquiera de las luminarias más veneradas de la historia (o villanos infames), note que su secuencia de ADN también tiene un 99% de superposición con la de cualquier chimpancé. [24] Las diferencias genéticas menores pueden tener un gran impacto.

Al construir los peldaños de la escalera de ADN, las bases se emparejan de acuerdo a una regla rígida: un puntal A en un riel de la escalera se une a un puntal T en el otro riel, un puntal G en un riel se une a un puntal C en el otro. La secuencia de bases en un lado de la escalera determina de manera única la secuencia en el otro. Y es dentro de la secuencia de letras que encontramos, entre otra información celular vital, las instrucciones que especifican qué aminoácidos se enlazarán con cuáles, dirigiendo la síntesis de una colección de proteínas específicas de la especie, esenciales para esa forma de vida.

Toda la vida codifica las instrucciones para construir proteínas de la misma manera.[25]

En un párrafo quizás demasiado detallado, aquí está el manual de cómo funciona, el código molecular Morse conectado a toda la vida. Grupos de tres letras consecutivas en un riel dado de ADN denotan un aminoácido en particular de la colección de veinte. [26] Por ejemplo, la secuencia CTA denota el aminoácido leucina; la secuencia GCT denota otro, alanina; la secuencia GTT denota valina; y así sucesivamente. Si se examinan los escalones unidos a un riel de un segmento de ADN y se lee la secuencia de nueve letras CTAGCTGTT, eso indicaría que se debe unir la leucina (las tres primeras letras, CTA) a la alanina (las tres segundas letras, GCT), que luego se uniría a la valina (las tres últimas letras, GTT). Una proteína construida a partir de, digamos, mil aminoácidos enlazados estaría codificada por una secuencia específica de tres mil letras (la ubicación inicial y final de cualquiera de estas secuencias también está codificada por secuencias particulares de tres letras, de manera muy parecida a como una letra mayúscula y un punto denotan el comienzo y el final de esta frase). Tal secuencia constituye un *gen*, el plano de instrucciones para ensamblar una proteína.[27]

He expuesto los detalles por dos razones. Primero, al ver el código se hace explícito el concepto de software celular. Dando un segmento de ADN, podemos leer las instrucciones que dirigen el funcionamiento interno de la célula, una coordinación sofisticada totalmente ausente en la materia inanimada. Segundo, ver el código demuestra lo que los biólogos

quieren decir cuando lo llaman universal. Cada molécula de ADN, ya sea de algas o de Sófocles, codifica la información necesaria para construir proteínas de la misma manera.

Esa es la unidad de la información de la vida.

La unidad de la energía de la vida

Al igual que una máquina de vapor necesita un suministro constante de energía para empujar repetidamente su pistón, la vida requiere un suministro constante de energía para llevar a cabo las funciones esenciales, desde el crecimiento y la reparación hasta el movimiento y la reproducción. En el caso de la máquina de vapor, extraemos energía del medio ambiente. Quemamos carbón, madera o algún otro combustible, y el calor generado es consumido por el mecanismo interno de la máquina, haciendo que el vapor se expanda. Los seres vivos también extraen energía del medio ambiente. Los animales extraen energía de los alimentos, las plantas de la luz solar. Pero a diferencia de la máquina de vapor, la vida no suele utilizar esa energía en el acto. Los procesos de la vida, al ser más complejos que la expansión o contracción del vapor, requieren un sistema más refinado para la entrega y distribución de la energía. La vida necesita la energía del combustible que quema para ser almacenada y distribuida de forma regular y fiable como lo requieren los componentes celulares.

Toda la vida se enfrenta al reto de la extracción y distribución de energía de la misma manera.[28]

La solución universal que la vida ha encontrado, una compleja secuencia de procesos que tienen lugar ahora mismo dentro de ti y de mí y, por lo que sabemos, todo lo demás que vive, está entre los logros más asombrosos de la naturaleza. La vida extrae energía del medio ambiente a través de un tipo de combustión química lenta y almacena esa energía cargando las baterías biológicas incorporadas en todas las células. Estos paquetes de baterías celulares proporcionan una fuente constante de electricidad que las células utilizan para sintetizar moléculas hechas a medida para transportar y entregar energía a cada componente celular.

Eso puede sonar pesado. Es pesado. También es vital. Así que vamos a desempacar brevemente. Si no captas todos los detalles, está bien. Incluso un recorrido superficial revela las maravillas de cómo la vida potencia su funcionamiento interno.

La quema química central para el procesamiento de la energía de la vida se llama reacción *redox*. No es el nombre más atractivo, pero el ejemplo arquetípico de un tronco en llamas aclara la nomenclatura. Cuando un tronco se quema, el carbono y el hidrógeno de la madera ceden electrones al oxígeno del aire (recuerde, el oxígeno anhela los electrones), uniéndolos en moléculas de agua y dióxido de carbono, y liberando energía en el proceso (la misma razón por la que el fuego está caliente). Cuando el oxígeno agarra los electrones, decimos que se ha *reducido* (puedes pensar en esto como una reducción del anhelo del oxígeno por los electrones). Cuando el carbono o el hidrógeno cede electrones al oxígeno, decimos que se ha *oxidado*. Juntos, tenemos una reacción de reducción-oxidación, o redox para abreviar.

Los científicos utilizan ahora el término "redox" de manera más amplia, refiriéndose a un conjunto de reacciones en las que los electrones pasan entre los componentes químicos, independientemente de que intervenga el oxígeno. Aún así, un tronco en llamas proporciona una plantilla ampliamente relevante para describir la quema química. Los átomos voraces, cargados por niveles parcialmente llenos, agarran los electrones de los donantes atómicos con un cierre tan poderoso que en el proceso se libera una cantidad significativa de energía acumulada.

En las células vivas, centrémonos en los animales para estar seguros, se producen reacciones redox similares pero, lo que es más importante, los electrones extraídos de los átomos que se ingieren en el desayuno no se transfieren directamente al oxígeno. Si lo fueran, la energía liberada crearía algo parecido a un fuego celular, un resultado que la vida ha aprendido el beneficio de evitar. En su lugar, los electrones donados por los alimentos pasan a través de una serie de reacciones redox intermedias, paradas de descanso en una caminata que finalmente termina con oxígeno pero que permite que se liberen cantidades más pequeñas de energía en cada paso. Como una pelota en las gradas que cae en cascada por los escalones de un estadio, los electrones saltan de un receptor molecular a otro, con cada receptor más loco que el anterior, asegurando que cada salto resulte en la liberación de energía. El oxígeno, el receptor más loco por los electrones, espera al electrón en la parte inferior de la escalera, y cuando finalmente llega, el oxígeno abraza al electrón con fuerza, exprimiendo la energía marginal que todavía puede proporcionar, concluyendo así el proceso de extracción de energía.

El proceso para las plantas es en gran medida el mismo. La principal diferencia es la fuente de los electrones. Para los animales, provienen de la comida. Para las plantas, provienen del agua. La luz del sol, al incidir sobre la clorofila de las hojas verdes de las plantas, despoja a los electrones de las moléculas de agua, bombea su energía, y los pone en una cascada redox de extracción de energía similar. Y así la energía que sostiene todas las acciones de todos los seres vivos puede ser rastreada a un mismo proceso, los electrones saltarines ejecutando una serie de reacciones redox celulares. Es por eso que Albert Szent-Györgyi, continuando sus reflexiones poéticas, meditó, "La vida no es más que un electrón buscando un lugar para descansar".

Desde la perspectiva de la física, vale la pena enfatizar lo sorprendente que es todo esto. La energía es la moneda que paga todas las idas y venidas en el cosmos, una moneda acuñada en una amplia gama de monedas y ganada a través de una gama aún más amplia de llamadas. Una moneda es la energía nuclear, generada por la fisión y la fusión entre una gran cantidad de especies atómicas; la energía electromagnética es otra, generada por empujes y tirones entre una gran cantidad de partículas cargadas; la energía gravitacional es otra aún, generada por las interacciones entre una gran cantidad de cuerpos masivos. Sin embargo, de todos los innumerables procesos, la vida en el planeta Tierra aprovecha un único mecanismo de energía: una secuencia específica de reacciones químicas electromagnéticas en la que los electrones se comprometen en una secuencia de saltos dirigida hacia abajo, comenzando con la comida o el agua y terminando con el abrazo del oxígeno.

¿Cómo y por qué este proceso de extracción de energía se convirtió en el mecanismo de entrada a la vida? Nadie lo sabe. Pero la universalidad, como la del código genético, habla de nuevo, y con fuerza, de la unidad de la vida. ¿Por qué todos los seres vivos se potencian de la misma manera? La respuesta inmediata es que toda la vida debe haber descendido de un ancestro común, una especie unicelular que los investigadores creen que probablemente existió hace unos cuatro mil millones de años.

Biología y Baterías

La evidencia de la unidad de la vida se hace aún más convincente a medida que seguimos el subsiguiente viaje de la energía liberada por los electrones que saltan de una reacción redox a otra. Esa energía se utiliza para cargar las baterías biológicas que están incorporadas en todas y cada una de las células. A su vez, las baterías biológicas alimentan la síntesis de moléculas particularmente aptas para transportar y entregar energía donde y cuando sea necesaria a través de una célula. Es un proceso elaborado. Pero a lo largo de la vida, es el mismo proceso.

A grandes rasgos, así es como va. Cuando un electrón salta a los brazos moleculares extendidos de un receptor redox dado, la molécula receptora se mueve, haciendo que cambie su orientación en relación con otras moléculas estrechamente empaquetadas a su alrededor, como un engranaje que da un paso adelante. Cuando el inconstante electrón salta al siguiente receptor redox, la primera molécula vuelve a su orientación original, mientras que el nuevo receptor molecular experimenta el movimiento. A medida que el electrón ejecuta más saltos, el patrón continúa. Las moléculas que reciben un electrón se mueven, cambiando su orientación hacia adelante; las moléculas que pierden un electrón también se mueven, cambiando su orientación hacia atrás.

La secuencia de saltos de electrones y las sacudidas moleculares resultantes cumplen una tarea sutil pero significativa. A medida que las moléculas se mueven hacia adelante y hacia atrás, empujan contra un grupo de protones, forzándolos a pasar a través de una membrana circundante, donde se acumulan en un delgado compartimiento, lo que equivale a una celda de contención superpoblada. O, en un lenguaje más prosaico, una batería de protones.

En una batería ordinaria, las reacciones químicas obligan a los electrones a acumularse en un lado de la batería (el ánodo), donde la repulsión mutua de estas partículas con carga similar significa que están preparadas para huir a la primera oportunidad. Cuando se completa un circuito eléctrico pulsando un botón de encendido o accionando un interruptor, se liberan los electrones acumulados, permitiéndoles salir del ánodo, pasar a través de una bombilla de dispositivo, un ordenador portátil, un teléfono y, finalmente, volver al otro lado de la batería (el cátodo). Aunque las baterías son comunes, son completamente ingeniosas. Almacenan energía en una colección de electrones atiborrados, listos para renunciar a esa energía en un momento dado para alimentar dispositivos de nuestra elección.

En una célula viva nos encontramos con una situación análoga, con protones reprimidos reemplazando a los electrones reprimidos. Pero es una distinción que difícilmente hace una diferencia. Los protones, como los electrones, todos llevan la misma carga eléctrica, y por

lo tanto también se repelen entre sí. Cuando las reacciones redox celulares empaquetan los protones muy juntos, ellos también están listos esperando la oportunidad de alejarse de sus compañeros forzados. Las reacciones redox celulares cargan así las baterías biológicas de protones. De hecho, debido a que los protones están todos agrupados en un lado de una membrana extremadamente fina (de sólo unas pocas docenas de átomos de ancho), el campo eléctrico (el voltaje de la membrana dividido por el grosor de la misma) puede ser enorme, más de decenas de millones de voltios por metro. Una biobatería celular no se queda atrás.

¿Qué hacen entonces las células con estas minicentrales? Aquí es donde las cosas se vuelven aún más sorprendentes. Atadas a la membrana hay una gran cantidad de turbinas a nanoescala. Cuando se permite que los protones empaquetados vuelvan a fluir a través de secciones específicas de la membrana, hacen que las diminutas turbinas giren, de la misma manera que las ráfagas de aire que fluyen hacen que los molinos de viento giren. En siglos pasados, este movimiento de rotación impulsado por el viento se utilizaba para triturar el trigo u otros granos para convertirlos en harina. Los molinos de viento celulares emprenden un proyecto de molienda análogo, pero en lugar de pulverizar la estructura, el proceso la construye. A medida que giran, las turbinas moleculares apiñan repetidamente dos moléculas particulares de entrada (ADP, adenosín difosfato más un grupo de fosfato), sintetizando una molécula particular de salida (ATP, adenosín trifosfato). Forzados a unirse por la turbina, los constituyentes de cada molécula de ATP resultante están en una disposición tensa: los constituyentes cargados, que se repelen mutuamente, están unidos entre sí por enlaces químicos, y así, de manera muy parecida a un resorte comprimido, se esfuerzan por liberarse. Eso es extraordinariamente útil. Las moléculas de ATP pueden viajar a través de una célula, liberando esa energía almacenada cuando se necesita, rompiendo los enlaces químicos y permitiendo que las partículas constituyentes se relajen en un estado de menor energía, más confortable. Es esa misma energía, liberada por la disociación de las moléculas de ATP, la que potencia las funciones celulares.

La incansable actividad de estas centrales celulares se hace evidente cuando se consideran algunos números. Las funciones que mantienen viva una célula típica durante un solo segundo requieren la energía almacenada en unos *diez millones de moléculas de* ATP. Tu cuerpo contiene decenas de trillones de células, lo que significa que cada segundo que consumes es del orden de cien millones de trillones (1020) de moléculas de ATP. Cada vez que se utiliza un ATP, se divide en las materias primas (ADP y un fosfato), que las turbinas alimentadas por baterías de protones vuelven a juntar en moléculas de ATP recién acuñadas y totalmente rejuvenecidas. Estas moléculas de ATP se ponen en marcha de nuevo, entregando energía a través de la célula. Para satisfacer las demandas de energía de su cuerpo, las turbinas celulares son por lo tanto sorprendentemente productivas. Incluso si eres un lector extremadamente rápido, mientras escaneas esta misma frase tu cuerpo está sintetizando unos quinientos millones de trillones de moléculas de ATP. Y justo ahora, otros trescientos millones de trillones más.

Resumen

Dejando de lado los detalles, la conclusión es que a medida que los electrones energéticos de los alimentos (o los electrones energizados por la luz solar en las plantas) caen en cascada por un tramo de escaleras químicas, la energía liberada en cada escalón carga las baterías biológicas que residen en todas las células. La energía almacenada en las baterías se utiliza entonces para sintetizar moléculas que hacen por la energía lo que los camiones UPS hacen por los paquetes: las moléculas entregan de manera confiable paquetes de energía dondequiera que se necesiten dentro de la célula. Este es el mecanismo universal que alimenta toda la vida. Este es el singular camino de energía que subyace a *cada* acción que tomamos y *cada pensamiento que* tenemos.

Como en nuestra breve incursión en el ADN, el punto principal se encuentra por encima de los detalles: la intrincada y aparentemente barroca colección de procesos que alimentan las células es universal en toda la vida. Esa unidad, junto con la unidad de la codificación del ADN de las instrucciones celulares, proporciona una evidencia abrumadora de que toda la vida surgió de un antepasado común.

De la misma manera que Einstein buscó una teoría unificada de las fuerzas de la naturaleza, y de la misma manera que los físicos de hoy en día sueñan con una síntesis aún más grandiosa que abarque toda la materia y tal vez también el espacio y el tiempo, hay algo muy seductor en la identificación de un núcleo común dentro de una amplia gama de fenómenos aparentemente distintos. Que el profundo funcionamiento interno de toda la vida -desde mis dos perros que descansan tranquilamente en la alfombra, hasta el caótico remolino de insectos atraídos por la lámpara cerca de mi ventana, hasta el coro de ranas que se elevan del estanque cercano, hasta los coyotes que ahora oigo aullar a la distancia- se base en los mismos procesos moleculares, bueno, es espectacular. Así que dejemos de lado los detalles, tomemos un descanso antes de concluir el capítulo, y permitamos que esa maravillosa realización se hunda por completo.

Evolución antes de la evolución

Las realizaciones vitales no sólo proporcionan una claridad imprevista, sino que también nos dan energía para cavar más profundo. ¿Cómo llegó a existir el antepasado común de toda la vida compleja? Más profundamente aún, ¿cómo comenzó la vida? Los científicos aún no han determinado el origen de la vida, pero nuestra discusión ha dejado claro que la pregunta tiene tres partes. ¿Cómo llegó a ser el componente genético de la vida, la capacidad de almacenar, utilizar y replicar información? ¿Cómo llegó a ser el componente metabólico de la vida, la capacidad de extraer, almacenar y utilizar la energía química? ¿Cómo llegó a ser el empaquetamiento de la maquinaria molecular genética y metabólica en sacos autónomos-células? La historia del origen de la vida requiere respuestas definitivas a estas preguntas, pero incluso sin una comprensión completa podemos recurrir a un marco explicativo -la evolución darwiniana- que casi con toda seguridad será una parte integral de esa narrativa futura.

Cuando conocí la evolución darwiniana, mi profesor de biología presentó la teoría como si fuera la solución inteligente a un rompecabezas que, una vez entendido, debería

provocar una suave bofetada en la frente y la exclamación "¿Por qué no pensé en eso?". El rompecabezas es explicar el origen de la rica, variada y abundante variedad de especies que habitan el planeta Tierra. La solución de Darwin se reduce a dos ideas conectadas: Primero, cuando los organismos se reproducen, la progenie es generalmente similar pero no idéntica a sus padres. O, como dijo Darwin, la reproducción produce descendencia con modificación. Segundo, en un mundo con recursos finitos, hay una competencia por la supervivencia. Las modificaciones biológicas que mejoran el éxito de la competencia aumentan la probabilidad de que el portador sobreviva lo suficiente como para reproducirse y así transmitir sus características de mejora de la supervivencia a las generaciones futuras. Con el tiempo, las diferentes combinaciones de modificaciones exitosas se acumulan lentamente, llevando a una población inicial a ramificarse en grupos que forman especies distintas.[29]

Simple e intuitiva, la evolución darwiniana casi parece evidente. Sin embargo, por muy convincente que sea su marco explicativo, si la evolución darwiniana no estuviera respaldada por datos, no habría logrado el consenso científico. La lógica no es suficiente. La confianza en la evolución darwiniana se basa en el abrumador apoyo que ha recibido de los científicos que han rastreado los cambios graduales en la estructura de los organismos y han delineado las ventajas de adaptación que muchos de los cambios conferidos. Si tales transformaciones estuvieran ausentes, o si se produjeran sin ningún patrón evidente, o si no guardaran relación con la capacidad del portador para sobrevivir o reproducirse, los escolares no estarían aprendiendo la evolución darwiniana.

Darwin no especificó la base biológica de la descendencia con modificación. ¿Cómo legan los seres vivos rasgos a su descendencia? ¿Y cómo algunos de esos rasgos descienden en forma modificada? En los tiempos de Darwin, las respuestas no se conocían. Claro, todos se dieron cuenta de que la pequeña María se parecía a mamá y papá, pero aún faltaban muchos descubrimientos para comprender el mecanismo molecular para transmitir los rasgos. El hecho de que Darwin pudiera desarrollar la teoría de la evolución en ausencia de tales detalles habla de la generalidad y el poder de las ideas. Trascienden los detalles esenciales. No fue hasta casi un siglo después, en 1953, que la iluminación de la estructura del ADN hizo visible el camino hacia una base molecular de la herencia. Con gentil moderación, Watson y Crick concluyeron su trabajo con una subestimación entre las más famosas del mundo: "No se nos ha escapado que el emparejamiento específico que hemos postulado sugiere inmediatamente un posible mecanismo de copia para el material genético".

Watson y Crick revelaron el proceso por el cual la vida duplica las mismas moléculas que almacenan las instrucciones internas de la célula, permitiendo que se pasen copias de las instrucciones a la progenie. Como hemos visto, la información que dirige la función celular está codificada en la secuencia de bases ensartadas a lo largo de los rieles de la escalera retorcida del ADN. Cuando una célula se prepara para reproducirse, para dividirse en dos, la escalera de ADN se divide por la mitad, dando dos rieles, cada uno de los cuales comprende una secuencia de bases. Dado que las secuencias son complementarias (una A en un riel asegura que hay una T en la posición correspondiente en el segundo riel; una C

en un riel asegura que hay una G en la posición correspondiente en el segundo riel), cada riel proporciona una plantilla para construir una copia del otro. Al unir las bases de los socios a las de cada uno de los rieles separados, la célula crea dos copias completas de la cadena de ADN original. Cuando la célula se divide posteriormente, cada célula hija recibe una de las copias duplicadas, transmitiendo la información genética de una generación a la siguiente, el mecanismo de copia que no había escapado a la atención de Watson y Crick.

Como se ha descrito, el proceso de copia produciría cadenas idénticas de ADN. Entonces, ¿cómo podrían surgir rasgos nuevos o modificados en las células hijas? Errores. Ningún proceso es 100 por ciento perfecto. Aunque es raro, los errores aparecerán, a veces por casualidad y otras veces por influencias ambientales como los fotones energéticos -radiación ultravioleta o de rayos X- que pueden corromper el proceso de copia. La secuencia de ADN que hereda una célula hija puede, por lo tanto, diferir de la aportada por su progenitor. A menudo, tales modificaciones son de poca importancia, como un simple error de imprenta en la página 413 de Guerra *y Paz.* Pero algunas modificaciones pueden afectar el funcionamiento de una célula, para bien o para mal. Las primeras, al mejorar la aptitud, tienen más posibilidades de ser transmitidas a las generaciones siguientes y por lo tanto de propagarse a través de la población.

La reproducción sexual añade complejidad porque el material genético no se duplica simplemente, sino que se forma por la fusión de las contribuciones de los progenitores masculinos y femeninos. Pero aunque dicha reproducción representó un paso trascendental en la historia de la vida en la Tierra, cuyo origen aún se debate, los principios darwinianos se aplican de todos modos. La mezcla y la copia de material genético producen variaciones en los rasgos heredados, y los que tienen más probabilidades de persistir a través de las generaciones son los que mejoran las perspectivas de supervivencia y reproducción del portador.

Esencial para la evolución es que en el descenso de padres a progenie, las modificaciones del ADN son típicamente pocas en número. Esta estabilidad protege las mejoras genéticas acumuladas en las generaciones anteriores, asegurando que no se degraden o se eliminen rápidamente. Para dar una idea de lo raro que son estos cambios, los errores de copia se suceden a un ritmo de aproximadamente uno por cada cien millones de pares de bases de ADN. Es como si un escriba medieval se equivocara en una letra por cada treinta copias de la Biblia. E incluso esa pequeña tasa es una sobreestimación, porque el 99 por ciento de las erratas son reparadas por mecanismos de corrección química que operan dentro de cada célula, reduciendo la tasa de error neto a aproximadamente uno por cada diez mil millones de pares de bases.

Incluso esa mínima modificación genética, cuando se acumula a lo largo de muchas generaciones, puede dar lugar a un desarrollo físico y fisiológico masivo. Esto no es obvio. Algunos que se encuentran con la maravilla del ojo, las capacidades del cerebro o la complejidad de los mecanismos de energía celular concluirán que estos sistemas no podrían haber evolucionado sin una inteligencia guía. Y esa conclusión estaría justificada si el desarrollo evolutivo se produjera en escalas de tiempo conocidas. No fue así. La vida ha evolucionado durante *miles de millones de* años. Eso son *miles* de millones *de años*. Si cada año estuviera representado por una hoja de papel de impresora, entonces mil millones de

años corresponderían a una pila de casi cien kilómetros de altura. Piense en esas páginas como si fueran un libro de bolsillo cuyo grosor es más de diez veces la altura del Monte Everest. Incluso si el dibujo de cada página difiere sólo ligeramente del anterior, los dibujos al principio y al final de la pila pueden ser fácilmente tan diferentes como lo es un chimpancé de una ameba.

Esto no significa que el cambio evolutivo siga un plan cuidadosamente diseñado que progresa gradual y eficientemente, página por página, de organismos simples a complejos. En su lugar, la evolución por selección natural se describe mejor como innovación por ensayo y error. Las innovaciones surgen de combinaciones aleatorias y mutaciones de material genético. Las pruebas enfrentan a una innovación contra otra en el ámbito de la supervivencia. Los errores, por definición, son innovaciones que pierden. Es un enfoque de la innovación que llevaría a la quiebra a la mayoría de las empresas. Probando una posibilidad aleatoria y luego otra, esperando contra toda esperanza que tarde o temprano una de ellas ilumine el mercado... bueno, intente presentar esa estrategia a su junta directiva. Pero la naturaleza tiene un superávit de un recurso que para los negocios es escaso: el tiempo. La naturaleza no tiene prisa y no necesita cumplir con una línea de fondo. El costo de innovar por pequeños cambios aleatorios es un costo que la naturaleza puede soportar.[30]

Un factor esencial, también, es que no había un solo libro de evolución aislado. Cada división celular en cada organismo ocupando cada rincón del planeta contribuyó a la narrativa Darwiniana. Algunas de estas líneas de la historia se esfumaron (modificaciones genéticas que fueron perjudiciales). La mayoría no añadió nada nuevo a la trama en curso (material genético transmitido sin cambios). Pero algunos proporcionaron giros inesperados (modificaciones genéticas que fueron útiles para la adaptación) que se desarrollarían en sus propios libros de evolución. Muchos de ellos, de hecho, apoyarían parcelas y subtramas interdependientes, de modo que la narrativa evolutiva de un libro de rotación estaría influenciada por la de otros. La riqueza de la vida en la Tierra refleja así la enorme duración de las crónicas evolutivas, ciertamente, pero también el enorme número de crónicas que la naturaleza ha escrito.

Como cualquier campo de investigación saludable, la evolución darwiniana ha sido debatida y refinada a lo largo de las décadas. ¿A qué ritmo evolucionan las especies? ¿Varía esa velocidad ampliamente a lo largo del tiempo? ¿Hay largos períodos de estasis seguidos por cortos períodos de cambio más rápido? ¿O el cambio es siempre gradual? ¿Cómo deberíamos pensar en los rasgos que podrían disminuir las perspectivas de supervivencia de un organismo al tiempo que aumentan las probabilidades de que se reproduzca? ¿Cuál es la lista completa de mecanismos por los que los genes pueden cambiar de generación en generación? ¿Cómo deberíamos responder a las lagunas en el registro evolutivo? Algunas de estas cuestiones han dado lugar a apasionadas peleas científicas pero -y esto es clave- nadie ha puesto en duda la evolución en sí misma. Los detalles de cualquier marco explicativo pueden y deben y serán perfeccionados con el tiempo, pero la base de la teoría Darwiniana es sólida como una roca.

Lo que plantea una pregunta: ¿Podría el marco darwiniano tener relevancia en un ámbito más amplio que el de la vida? Después de todo, los ingredientes esenciales -replicación, variación y competición- no se limitan a los seres vivos. Las impresoras replican las páginas. Las distorsiones ópticas producen variaciones en las copias. El receptor inalámbrico de la impresora compite por un ancho de banda limitado. Imaginemos, entonces, un contexto más cercano a la vida que las impresoras de oficina pero decididamente inanimado: moléculas que han adquirido la capacidad de replicarse. El ADN es un ejemplo perfecto, así que téngalo en cuenta. Pero la replicación del ADN, la división de su escalera retorcida y la subsiguiente reconstrucción de cada riel componente en dos moléculas hijas de ADN plenamente desarrolladas, depende de un ejército de proteínas celulares, y por lo tanto requiere que los procesos de la vida ya estén en su lugar.

Imaginen en cambio una molécula que pueda replicarse por sí misma, mucho antes de que haya surgido vida en cualquier lugar. No necesitamos comprometernos con un mecanismo de replicación definido, pero para tener una imagen mental concreta, tal vez al flotar en un rico guiso químico este tipo de molécula actúa como un imán molecular, atrayendo fuertemente los mismos constituyentes que la componen y proporcionando una plantilla para ensamblarlos en un imitador molecular. Imaginen, también, que el proceso de replicación, como todos los procesos en el mundo real, es imperfecto. La mayoría de las veces una molécula recién sintetizada es idéntica a la original, pero a veces no lo es. A lo largo de muchas generaciones moleculares, construimos así un ecosistema habitado por un espectro de moléculas que son variaciones del original.

En cualquier entorno siempre hay materias primas limitadas, recursos limitados. Así que mientras nuestro ecosistema de moléculas continúe replicándose, prevalecerán las que se repliquen de forma más eficiente y precisa -rápidas, baratas, pero lejos de estar fuera de control-. Tales moléculas obtienen el título de las más "aptas" y con el tiempo dominarán la población molecular. Cada mutación subsiguiente que surja de una replicación imperfecta ofrece aún más modificaciones de la aptitud molecular. Y como con todas las cosas vivas, también con todas las cosas que no lo son: las modificaciones que mejoran la aptitud molecular triunfarán sobre las que no lo hacen. La mayor fecundidad de las moléculas más aptas hace que la demografía se incline hacia esas mismas moléculas.

Lo que he descrito es una versión molecular del *darwinismo molecular* de la evolución. Muestra cómo los grupos de partículas empujadas guiadas únicamente por las leyes de la física pueden llegar a ser cada vez más adeptos a la reproducción, algo que normalmente asociamos con la vida. Cuando buscamos el origen de la vida, esto sugiere que el Darwinismo molecular puede haber sido un mecanismo esencial durante la era que condujo a la aparición de la primera vida. Una versión de esa sugerencia, lejos del consenso pero que ha ganado un significativo seguimiento, se basa en una molécula especial de múltiples talentos: EL ARN.

Hacia los orígenes de la vida

En el decenio de 1960, varios investigadores prominentes, entre ellos Francis Crick, el químico Leslie Orgel y el biólogo Carl Woese, llamaron la atención sobre un primo cercano

del ADN, llamado ARN (ácido ribonucleico), que hace unos cuatro mil millones de años pudo haber puesto en marcha una fase del darwinismo molecular que fue el precursor de la vida.

El ARN es una molécula extraordinariamente versátil que es un componente esencial de todos los sistemas vivos. Se puede pensar en ella como una versión más corta y unilateral del ADN, que comprende un único raíl a lo largo del cual se fija una secuencia de bases. Entre sus diversas funciones celulares, el ARN es un mediador químico que toma huellas de varias pequeñas secciones de una hebra "descomprimida" de ADN, de forma similar a como un dentista puede tomar un molde de sus dientes cuando separa sus mandíbulas superior e inferior, y transporta la información a otras partes de la célula, donde dirige la síntesis de proteínas específicas. Como el ADN, las moléculas de ARN incorporan así la información celular y por lo tanto son un componente del software de una célula. Pero hay una diferencia importante entre el ARN y el ADN: mientras que el ADN se contenta con ser el oráculo de la célula, una fuente de sabiduría que dirige la actividad celular, el ARN está dispuesto a ensuciarse las manos con el trabajo manual de los procesos químicos. De hecho, los ribosomas de la célula - minifábricas que unen los aminoácidos para producir proteínas - tienen una variedad particular de ARN (ARN ribosomal) en su núcleo.

Por lo tanto, el ARN es tanto software como hardware. Puede dirigir y catalizar reacciones químicas. Y entre tales reacciones hay algunas que promueven la replicación del propio ARN. Mientras que la maquinaria molecular que hace copias de ADN utiliza una elaborada colección de engranajes y ruedas químicas, el ARN en sí mismo puede promover la síntesis de los pares de bases necesarios para su propia replicación. Considere la implicación. Las moléculas de ARN, mezclando software y hardware, tienen el potencial de evitar el enigma del huevo y la gallina: ¿Cómo ensamblar hardware molecular sin tener primero el software molecular, las instrucciones para llevar a cabo el ensamblaje? ¿Cómo se sintetiza el software molecular sin tener primero el hardware molecular, la infraestructura para llevar a cabo la síntesis? Al incorporar ambas funciones, el ARN fusiona el huevo y la gallina, y por lo tanto tiene la capacidad de impulsar una era de darwinismo molecular.

Tal es la propuesta de RNA World. Imagina que antes de que existiera la vida había un mundo repleto de moléculas de ARN, que a través del darwinismo molecular evolucionaron durante un número casi insondable de generaciones hasta convertirse en las estructuras químicas que constituyeron las primeras células. Aunque los detalles son provisionales, los científicos han esbozado cómo pudo haber sido esta fase de la evolución molecular. En el decenio de 1950, el premio Nobel Harold Urey y su estudiante de posgrado Stanley Miller mezclaron gases (hidrógeno, amoníaco, metano, vapor de agua) que creían que constituían la atmósfera primitiva de la Tierra, dispararon los cócteles gaseosos con corrientes eléctricas para simular rayos y anunciaron, como es sabido, que el lodo marrón resultante contenía aminoácidos, los componentes básicos de las proteínas. Aunque las investigaciones posteriores demostraron que las mezclas gaseosas iniciales que Miller y Urey estudiaron no reflejaban con precisión la composición química de la atmósfera primitiva de la Tierra, experimentos similares llevados a cabo con otros cócteles gaseosos que sí lo hacían (incluida una mezcla que los propios Miller y Urey habían preparado para

modelar los vapores tóxicos de los volcanes activos, que, curiosamente, permanecieron sin analizar durante más de medio siglo [31]) tuvieron el mismo éxito en la generación de aminoácidos. Además, los aminoácidos han sido detectados en nubes interestelares, en cometas y en meteoritos. Así que, plausiblemente, un guiso químico en la joven Tierra puede haber mezclado moléculas de ARN replicantes con un abundante surtido de aminoácidos.

Imaginemos, entonces, que mientras las moléculas de ARN continuaban replicándose, una mutación fortuita facilitó algo novedoso: el ARN mutante consiguió que algunos de los aminoácidos del guiso ambiental se engancharan en cadenas que produjeron las primeras proteínas rudimentarias (una versión cruda de los tipos de procesos que ahora tienen lugar en los ribosomas). Si, por casualidad, algunas de estas proteínas básicas aumentaran la eficiencia de la replicación del ARN -después de todo, catalizar las reacciones es, en parte, lo que hacen las proteínas- serían muy bien recompensadas: las proteínas llevarían la forma mutante de ARN a la dominación, y el nuevo suministro abundante de ARN mutante ayudaría a sintetizar más proteínas. En tándem, constituirían un bucle químico auto-reforzado que impulsaría las aberraciones moleculares fortuitas a convertirse en la norma. Con el tiempo, las continuas maquinaciones moleculares podrían dar con otra novedad química, una escalera de doble carril -una forma rudimentaria de ADN- que demostró ser una estructura más estable y más eficiente para la replicación molecular, y por lo tanto usurpó gradualmente los procesos de replicación y relegó al ARN a un papel de apoyo. La formación fortuita de bolsas moleculares -paredes de las células- aumentaría aún más la aptitud, concentrando los productos químicos en las regiones secuestradas y ofreciendo protección contra las perturbaciones ambientales. Extendiéndose por toda la población química, las estructuras necesarias para las primeras células rudimentarias se reunirían.[32]

La vida nacería.

El Mundo del ARN es sólo una de las numerosas propuestas. Es un ejemplo que da prioridad al componente genético de la vida: las moléculas que encarnan la información y a través de la replicación transmiten esa información a las generaciones posteriores. Si la propuesta resultara ser correcta, aún tendríamos que abordar el origen del propio ARN; tal vez una etapa aún más temprana de la evolución molecular podría haber generado ARN a partir de componentes químicos aún más simples. Otras propuestas dan más peso al componente metabólico de la vida: las moléculas que catalizan las reacciones. En lugar de una molécula que se replique y que pueda actuar como proteína, estos escenarios comienzan con moléculas de proteína que se puedan replicar. Otras propuestas prevén dos desarrollos totalmente distintos, uno que conduce a moléculas que se replican y otro que conduce a moléculas que catalizan reacciones químicas, y sólo más tarde estos procesos se fusionan en células que pueden llevar a cabo las funciones básicas de la reproducción y el metabolismo.

También abundan las propuestas sobre dónde se formaron los antecedentes químicos de la vida. Algunos investigadores concluyen que la sugerencia de Darwin de un "pequeño estanque caliente" no es particularmente prometedora porque durante cientos de millones de años los escombros rocosos llovieron sobre la tierra, haciendo que la superficie fuera menos que hospitalaria. [33] Aún así, el biólogo David Deamer ha sugerido que es esencial

para el origen de la vida un entorno que oscile entre húmedo y seco, como la tierra al borde de un estanque o un lago. Las investigaciones de su equipo han demostrado que esos ciclos húmedos y secos pueden impulsar a los lípidos a formar membranas -paredes celulares- dentro de las cuales se pueden persuadir fragmentos moleculares para que se conecten en cadenas más largas, similares al ARN y al ADN. [34] El químico Graham Cairns-Smith ha propuesto que los cristales que constituyen los lechos de arcilla -estructuras que crecen al encerrar continuamente los átomos en un patrón ordenado y repetitivo- pueden haber constituido un sistema temprano de replicación que fue un precursor de tal comportamiento en moléculas orgánicas más complejas en ruta hacia la vida. [35] Otro contendiente convincente, sugerido y desarrollado por el geoquímico Mike Russell y el biólogo Bill Martin, son las grietas en el fondo del océano que arrojan penachos cálidos y ricos en minerales generados por la interacción del agua de mar con la roca que constituye el manto de la Tierra. [36] Estos llamados respiraderos hidrotermales alcalinos precipitan chimeneas de piedra caliza que se elevan desde el fondo del mar -algunos crecen hasta una altura de más de cincuenta metros, más altos que la Estatua de la Libertad- cargados de rincones y grietas por los que fluye continuamente una enérgica inundación de productos químicos. La propuesta prevé que dentro de los muchos remolinos que se forman dentro de las torres, el darwinismo molecular realiza su magia química, dando lugar a replicadores que con el tiempo aumentan su complejidad y sofisticación, en última instancia, generando vida en la tierra.

Los detalles ocupan la investigación de vanguardia. Hasta la fecha, los intentos de laboratorio para recrear estos procesos son intrigantes pero no concluyentes. Todavía tenemos que crear vida desde cero. Tengo pocas dudas de que un día, quizás no muy lejano, lo haremos. Mientras tanto, está surgiendo una narrativa científica global sobre el origen de la vida. Una vez que las moléculas adquieran la capacidad de replicarse, los errores y mutaciones fortuitas alimentarán el Darwinismo molecular, conduciendo los brebajes químicos a lo largo del importantísimo vector del aumento de la aptitud. Durante cientos de millones de años, el proceso tiene la capacidad de construir la arquitectura química de la vida.

La física de la información

A estas alturas, puede haber concluido que las moléculas de la vida deben haber superado sus estudios de química orgánica. De lo contrario, ¿cómo podrían saber lo que se supone que deben hacer? ¿Cómo sabe el ADN que debe separarse por la mitad y unir las bases complementarias a las que ha expuesto, creando una molécula duplicada? ¿Cómo sabe el ARN hacer copias de secciones de ADN, transportar esa información a las estructuras celulares apropiadas donde otras moléculas distintas pero relacionadas saben leer el código genético y enlazar las secuencias apropiadas de aminoácidos en proteínas funcionales?

Por supuesto, las moléculas no saben nada. Su comportamiento se rige por las leyes de la física ciegas, sin sentido y no escolarizadas. Pero la pregunta sigue siendo: ¿Cómo llevan a cabo de manera consistente y confiable una serie de procesos químicos complejos? Es una

pregunta que me lleva a parafrasear la pregunta principal de Schrödinger en *¿Qué es la vida?*: El movimiento y el movimiento de las moléculas dentro de una roca están gobernados por las leyes de la física. El movimiento y la trayectoria de las moléculas dentro de un conejo también se rigen por las leyes de la física. ¿En qué se diferencian? Hemos visto que las partículas del conejo están guiadas por una influencia adicional: el archivo interno de información del conejo, su software celular. De manera importante, crítica y vital: Esta información no reemplaza las leyes de la física. Nada lo hace. En cambio, de la misma manera que un tobogán de agua no reemplaza las leyes de la gravedad, sino que a través de su forma guía a los jinetes a lo largo de una trayectoria específica que de otro modo no seguirían, el software celular del conejo es transportado por arreglos químicos que a través de su forma, estructura y componentes guían a varias moléculas a lo largo de trayectorias que de otro modo tampoco seguirían.

¿Cómo funcionan estas guías moleculares? Debido a la detallada disposición de sus átomos constituyentes, una determinada molécula puede atraer este aminoácido, repelerlo y ser completamente indiferente a los demás. O, como las piezas de Lego emparejadas, una molécula dada podría romperse con sólo una otra molécula específica. Todo esto es física. Cuando los átomos y las moléculas empujan o tiran o se juntan, es la fuerza electromagnética la que entra en acción. El punto, entonces, es que la información en una célula no es abstracta. No es un conjunto de instrucciones flotantes que las moléculas necesitan estudiar, memorizar y ejecutar. En su lugar, la información está codificada en las propias disposiciones moleculares, disposiciones que inducen a otras moléculas a chocar o unirse o interactuar de una manera que lleva a cabo procesos celulares como el crecimiento, la reparación o la reproducción. Aunque las moléculas que habitan en una célula carecen de intención o propósito, y aunque son completamente inconscientes, su estructura física les permite realizar tareas altamente especializadas.

En este sentido, los procesos de la vida son meandros moleculares completamente descritos por la ley física que cuentan simultáneamente una historia de nivel superior, basada en la información. En el caso de la roca, no hay una historia de nivel superior. Cuando usas las leyes de la física para describir los choques de las moléculas de la roca, estás acabado. Pero cuando usas las mismas leyes de la física para describir los saltos y empujones de las moléculas de los conejos, no has terminado. Ni de lejos. Superpuesta a la historia del reduccionista hay toda una historia adicional que cuenta los arreglos moleculares internos únicos del conejo que coreografían un exquisito espectro de movimientos moleculares organizados. Y son estos movimientos moleculares los que llevan a cabo procesos de alto nivel dentro de las células del conejo.

De hecho, para el conejo, y para nosotros también, esa información biológica también se organiza a mayor escala, guiando procesos que actúan no sólo dentro de las células individuales sino a través de colecciones de células, lo que da la calidad distintiva de la complejidad coordinada. Cuando se toma una taza de café, el movimiento de cada átomo que constituye cada molécula en la mano, brazo, cuerpo y cerebro está totalmente gobernado por las leyes de la física. De nuevo, con gusto: La vida no contrae ni puede contravenir las leyes físicas. Nada puede. Pero el hecho de que un gran número de tus moléculas puedan actuar en concierto, coordinando su movimiento global para hacer que tu

brazo se extienda a través de una mesa y tu mano agarre una taza, refleja la riqueza de la información biológica, encarnada en los arreglos atómicos y moleculares, dirigiendo una profusión de complejos procesos moleculares.

La vida es física orquestada.

La termodinámica y la vida

La evolución, según Darwin, guía el desarrollo de las estructuras desde las moléculas a las células simples hasta los organismos multicelulares complejos. La entropía, por Boltzmann, traza el desarrollo de los sistemas físicos, desde los aromas a las máquinas de calor hasta las estrellas ardientes. La vida está sujeta a estas dos influencias guía: La vida surgió y se refinó a través de la evolución. La vida, como todos los sistemas físicos, se rige por los dictados de la entropía. En el último par de capítulos de *¿Qué es la vida?,* Schrödinger exploró la aparente tensión entre ambos. Cuando la materia se une a la vida, mantiene el orden durante largos períodos de tiempo. Y a medida que la vida se reproduce, genera colecciones adicionales de moléculas que también están dispuestas en estructuras ordenadas. ¿Dónde está la entropía, el desorden y la segunda ley de la termodinámica?

En su respuesta, Schrödinger explicó que los organismos se resisten al aumento de la entropía "alimentándose de la entropía negativa", [37] una frase que a lo largo de los decenios ha generado una pequeña confusión y una crítica persistente. Pero está claro que aunque lo expresó en un lenguaje algo diferente, la respuesta de Schrödinger es la misma que hemos estado desarrollando: el doble paso de la entropía. Los seres vivos no están aislados, y por lo tanto cualquier contabilidad de la segunda ley debe incorporar su entorno. Llévame a mí. Durante más de medio siglo he conseguido que mi entropía no se dispare a través del techo. Lo he hecho tomando estructuras ordenadas (principalmente vegetales, nueces y granos), quemándolas lentamente (a través de reacciones redox, los electrones de la comida caen en cascada por las escaleras del estadio y finalmente se combinan con el oxígeno que he inhalado), usando la energía liberada para impulsar varias actividades metabólicas, y dispensando entropía al medio ambiente a través de los desechos y el calor. En general, los dos pasos han permitido que mi entropía aparentemente se burle de la segunda ley, mientras que el medio ambiente me ha respaldado diligentemente, asumiendo la holgura entrópica. El proceso de quemar, almacenar y liberar energía para potenciar las funciones celulares es más elaborado que el proceso correspondiente que potencia los motores de vapor, pero entropicalmente hablando la física esencial es la misma.

Más allá de la elección del lenguaje de Schrödinger, una preocupación menos quisquillosa es el origen de la alimentación de alta calidad y baja entropía. Desde los animales hasta la cadena alimenticia encontramos plantas que se alimentan directamente de la luz solar. Su ciclo de energía proporciona otro ejemplo del doble paso entrópico. Los fotones solares entrantes absorbidos por las células de las plantas empujan a los electrones a estados de mayor energía, que la maquinaria celular aprovecha (a través de una serie de reacciones redox que guían a los electrones por las escaleras del estadio) para alimentar varias funciones celulares. Los fotones del sol son, por lo tanto, el alimento de calidad y

baja entropía que las plantas absorben, explotan para los procesos de la vida, y luego liberan en una forma degradada de alta entropía como desecho (por cada fotón recibido del sol, la tierra envía una colección menos ordenada de un par de docenas de fotones infrarrojos agotados energéticamente y ampliamente dispersos de vuelta al espacio).[38]

Siguiendo el rastro hacia la fuente de baja entropía aún más lejos, buscamos el origen del sol, que encaja con la historia gravitatoria del capítulo 3: la gravedad comprime las nubes de gas en las estrellas, disminuyendo la entropía interna y, a través del calor liberado, elevando la entropía del ambiente circundante. En última instancia, las reacciones nucleares se encienden, las estrellas se iluminan y los fotones se envían en flujo hacia el exterior. Cuando esa estrella es el sol, esos fotones que llegan a la tierra son la fuente de energía de baja entropía que impulsa el metabolismo de las plantas, dejando claro por qué los investigadores suelen decir que la fuerza gravitatoria sostiene la vida. Si bien es cierto, a estas alturas ya saben que me gusta compartir el crédito de manera más equitativa, alabando la gravedad por causar la aglomeración de la materia y asegurar entornos estelares estables, pero también ensalzando la fusión nuclear por la incesante producción de un flujo constante de fotones de alta calidad durante millones y miles de millones de años.

La fuerza nuclear, en tándem con la gravedad, es una fuente de combustible de baja entropía que da vida.

¿Una teoría general de la vida?

En sus conferencias de 1943, Schrödinger enfatizó que el torrente de desarrollos científicos había sido tan intenso que "se ha vuelto casi imposible para una sola mente comandar más que una pequeña porción especializada".[39] En consecuencia, alentó a los pensadores a ampliar el alcance de su experiencia explorando reinos fuera de su tradicional terreno intelectual. Con *¿Qué es la vida? trajo descaradamente* el entrenamiento, la intuición y la sensibilidad de un físico a los rompecabezas de la biología.

En los decenios siguientes, a medida que los conocimientos se han ido especializando cada vez más, una creciente cohorte de investigadores ha seguido haciendo sonar la llamada interdisciplinaria de Schrödinger. Muchos han respondido. Investigadores con formación en campos como la física de alta energía, la mecánica estadística, la informática, la teoría de la información, la química cuántica, la biología molecular y la astrobiología, entre muchos otros, han desarrollado nuevas y perspicaces formas de sondear la naturaleza de la vida. Cerraré este capítulo centrándome en un desarrollo de este tipo que amplía nuestro tema termodinámico y, si el programa tiene éxito, puede que algún día ayude a responder algunas de las preguntas más profundas de la ciencia: ¿Podría la vida ser una posibilidad tan remota que surgiera sólo una vez en un universo que contiene cientos de miles de millones de galaxias, cada una con cientos de miles de millones de estrellas, muchas de las cuales tienen planetas en órbita? ¿O es la vida el resultado natural, tal vez incluso el resultado inevitable, de ciertas condiciones ambientales básicas y relativamente comunes, que sugiere un cosmos lleno de vida?

Para abordar cuestiones de tan amplio alcance necesitamos principios con un alcance comparable. A estas alturas, hemos visto amplia evidencia de la aplicabilidad expansiva de

la termodinámica, una teoría física que Einstein describió como la única para la que podía declarar con confianza "nunca será derrocada". [40] Tal vez al analizar la naturaleza de la vida - su origen y evolución - podamos llevar la perspectiva termodinámica aún más lejos.

En las últimas décadas, los científicos han hecho precisamente eso. La disciplina de investigación que ha surgido (llamada *termodinámica de no-equilibrio*) analiza sistemáticamente los tipos de situaciones que hemos encontrado repetidamente: energía de alta calidad que circula a través de un sistema, alimentando los dos pasos entrópicos y permitiendo así que el sistema resista la atracción hacia el desorden interno que de otra manera se mantendría. El fisicoquímico belga Ilya Prigogine, que fue galardonado con el Premio Nobel en 1977 por su trabajo pionero en este campo, desarrolló las matemáticas para analizar las configuraciones de la materia que, cuando se someten a una fuente continua de energía, pueden convertirse espontáneamente en orden, lo que Prigogine llamó "orden del caos". Si tenías una buena clase de física en la escuela secundaria, puede que hayas encontrado un ejemplo simple pero impresionante, las células de Bénard. Calienta un plato plano que contiene un charco de aceite viscoso. Al principio no sucede mucho. Pero al aumentar gradualmente la energía que fluye por el líquido, los movimientos moleculares aleatorios conspiran para producir un orden visible. Mirando hacia abajo en el aceite, lo verás teselar en una colección de pequeñas cámaras hexagonales. Mirando desde el lado, verás el líquido fluyendo en un patrón estable y regular, subiendo desde el fondo de cada cámara hexagonal, alcanzando la parte superior, y luego volviendo al fondo de la cámara.

Desde el punto de vista de la segunda ley de la termodinámica, tal orden espontáneo es totalmente inesperado. Surge porque las moléculas del líquido están sujetas a una influencia ambiental particular: son calentadas continuamente por la llama. Y esta persistente inyección de energía tiene un impacto significativo. En cualquier sistema habrá ocasionalmente fluctuaciones espontáneas que momentáneamente forman un pequeño patrón ordenado y localizado. Usualmente tales fluctuaciones diminutas se dispersan rápidamente de nuevo en una forma desordenada. Pero el análisis de Prigogine mostró que cuando las moléculas están en ciertos patrones especiales se vuelven excepcionalmente hábiles para absorber energía, y esto dicta un destino diferente. Si el sistema físico está recibiendo un flujo constante de energía concentrada del medio ambiente, los patrones moleculares especiales pueden utilizar la energía para sostener o incluso mejorar su forma ordenada, mientras que arrojan una forma degradada de esa energía (menos accesible, más dispersa) de vuelta al medio ambiente. Se dice que los patrones ordenados disipan la energía y por lo tanto se llaman *estructuras disipadoras.* La entropía total, incluyendo la ambiental, aumenta, pero al bombear constantemente la energía en un sistema podemos impulsar y mantener el orden a través de una entropía sostenida de dos pasos.

La descripción de Prigogine es paralela a la explicación física, que se remonta a Schrödinger, de cómo los organismos evitan la degradación entrópica. No es que las células de Bénard estén vivas, sino que los seres vivos son estructuras disipadoras, también, que absorben energía del medio ambiente, la utilizan para sostener o mejorar su forma ordenada, y liberan una forma degradada de esa energía de vuelta al medio ambiente. Los resultados de Prigogine proporcionaron una articulación matemáticamente precisa de su lema "orden desde el caos"; muchos investigadores posteriores especularon que las

matemáticas podrían desarrollarse más, quizás dando una idea de cómo las moléculas ordenadas necesarias para la vida emergieron del caos de los movimientos moleculares aleatorios que tuvieron lugar en la Tierra temprana.

De las muchas contribuciones a este programa, el reciente trabajo de Jeremy England (que amplía los resultados anteriores desarrollados por investigadores como Christopher Jarzynski y Gavin Crooks) es particularmente emocionante. [41] A través de ingeniosas manipulaciones matemáticas, Inglaterra ha sacado a relucir las implicaciones de la segunda ley de la termodinámica cuando se aplica a sistemas alimentados por una fuente de energía externa. Para tener una idea de su resultado, imagínese que está en un columpio de un patio de recreo. Como todo niño sabe intuitivamente, hay que bombear las piernas (y angular el cuerpo) al ritmo adecuado para poner en marcha el columpio y mantener un movimiento suave y rítmico. Y ese ritmo, según la física básica, depende de la distancia entre el asiento y el pivote del columpio. Si bombeas las piernas a un ritmo incorrecto, el desajuste rítmico impide que el columpio absorba eficientemente la energía que estás proporcionando, y por lo tanto no te columpiarás alto. Imagina, sin embargo, que este balanceo en particular tiene una característica inusual: a medida que bombeas tus piernas, la longitud del balanceo cambia, ajustando el período de su movimiento para que coincida con el de tus piernas. Esta "adaptación" permite al columpio entrar rápidamente en la ranura, absorber la energía que ofrece y alcanzar rápidamente una altura satisfactoria en cada ciclo. Posteriormente, la energía de su acción de bombeo es absorbida por el columpio, pero no impulsa el columpio más alto. En cambio, la energía que usted introduce mantiene el movimiento del columpio estable trabajando contra las fuerzas de fricción compensatorias y, en el proceso, produciendo residuos (calor, sonido, etc.) que se disipan de nuevo al entorno (suponiendo que usted no sea un temerario como mi hija, que espera el punto alto del columpio para volar desde el asiento, elevarse, y luego disipar la energía dando vueltas por el suelo).

El análisis matemático de Inglaterra reveló que en el dominio molecular, las partículas que están siendo "empujadas" por una fuente externa de energía pueden tener una experiencia análoga a su escapada al patio de recreo. Una colección inicialmente desordenada de partículas puede adaptar su configuración para "meterse en la ranura", para formar un arreglo que absorba más eficientemente la energía del ambiente, la use para mantener o mejorar el movimiento o la estructura interna ordenada, y luego disipe una forma degradada de esa energía de vuelta al ambiente.

Inglaterra llama al proceso de adaptación disipativa. Potencialmente, proporciona un mecanismo universal para persuadir a ciertos sistemas moleculares para que se levanten y bailen el paso doble entrópico. Y como eso es lo que los seres vivos hacen para vivir - toman energía de alta calidad, la utilizan, y luego devuelven energía de baja calidad en forma de calor y otros desechos - tal vez la adaptación disipativa era esencial para el origen de la vida. [42] Inglaterra observa que la propia replicación es una potente herramienta de adaptación disipativa: si una pequeña colección de partículas se ha hecho hábil para absorber, usar y dispensar energía, entonces dos de esas colecciones son aún mejores, como lo son cuatro u ocho, y así sucesivamente. Las moléculas que pueden replicarse podrían ser entonces un resultado esperado de la adaptación disipativa. Y una vez que las moléculas

que se replican aparecen en la escena, el Darwinismo molecular puede hacer efecto, y el impulso a la vida comienza.

Estas ideas están en su fase inicial, pero no puedo evitar pensar que habrían hecho feliz a Schrödinger. Usando principios físicos fundamentales, hemos desarrollado una comprensión del big bang, la formación de estrellas y planetas, la síntesis de átomos complejos, y ahora estamos determinando cómo esos átomos podrían organizarse en moléculas replicantes bien adaptadas para extraer energía del medio ambiente para construir y sostener formas ordenadas. Con el poder del darwinismo molecular para seleccionar para colecciones moleculares siempre adecuadas, podemos imaginar cómo algunos podrían adquirir la capacidad de almacenar y transmitir información. Un manual de instrucciones transmitido de una generación molecular a la siguiente, que conserva las estrategias de aptitud probadas en batalla, es una fuerza potente para el dominio molecular. Actuando a lo largo de cientos de millones de años, estos procesos pueden haber esculpido gradualmente la primera vida.

Ya sea que los detalles de estas ideas sobrevivan o no a futuros descubrimientos, el esquema de la historia de la vida según la física está tomando forma. Y si esa historia resulta ser tan general como sugieren los trabajos recientes, la vida podría ser una característica común del cosmos. Por muy emocionante que sea, la vida es una cosa y la vida inteligente otra muy distinta. Encontrar microbios en Marte o en la luna de Júpiter, Europa, sería un descubrimiento monumental. Pero como seres pensantes, conversos y creativos, seguiríamos estando solos.

¿Cuál es, entonces, el camino de la vida a la conciencia?

5

LAS PARTÍCULAS Y LA CONCIENCIA

De la vida a la mente

En algún lugar entre las primeras células procariotas hace cuatro mil millones de años y los noventa mil millones de neuronas del cerebro humano enredadas en una red de cien billones de conexiones sinápticas, surgió la capacidad de pensar y sentir, de amar y odiar, de temer y anhelar, de sacrificar y reverenciar, de imaginar y crear -nuevas capacidades que encenderían logros espectaculares así como una destrucción incalculable. "Todo comienza con la conciencia y nada vale la pena excepto a través de ella", [1] es como dijo Albert Camus. Sin embargo, hasta los últimos años, la conciencia era una palabra no deseada en las ciencias duras. Claro, los investigadores que se tambalean en el crepúsculo de sus carreras podrían ser perdonados por volverse hacia el tema marginal de la mente, pero la meta de la investigación científica convencional es la comprensión de la realidad objetiva. Y para muchos, y durante mucho tiempo, la conciencia no calificaba. La voz que parlotea dentro de tu cabeza, bueno, sólo puede ser escuchada dentro de tu cabeza.

Es una postura irónica. El *"Cogito, ergo sum" de* Descartes resume nuestro contacto con la realidad. Todo lo demás podría ser una ilusión, pero pensar es lo único de lo que incluso el escéptico más acérrimo puede estar seguro. Y a pesar de la frase de Ambrose Bierce "Pienso que pienso, luego pienso que soy," [2] si estás pensando, el caso de existir es fuerte. Para que la ciencia no preste atención a la conciencia, sería apartarse de lo único con lo que cada uno de nosotros puede contar. De hecho, durante miles de años muchos han negado la finalidad de la muerte colgando la esperanza existencial en la conciencia. El cuerpo muere. Eso es aparente, obvio, innegable. Pero nuestra aparentemente persistente voz interior, así como los abundantes pensamientos, sensaciones y emociones que llenan cada uno de nuestros mundos subjetivos, hablan de una presencia etérea que, algunos han imaginado, está fuera de los hechos básicos de la existencia física. Atman, ánima, alma inmortal - se le han dado muchos nombres, pero todos connotan la creencia de que el yo consciente se conecta con algo que sobrevive a la forma física, algo que trasciende la ciencia mecanicista tradicional. La mente no sólo es nuestro lazo con la realidad, sino también con la eternidad.

Ahí hay una pista más reveladora de por qué las ciencias duras han resistido por mucho tiempo a la conciencia de todas las cosas. La ciencia reacciona al hablar de reinos más allá del alcance de la ley física con una mueca exasperada, un giro en sus talones, y un rápido retorno al laboratorio. Esta burla representa una actitud científica dominante pero también pone de relieve una brecha crítica en la narrativa científica. Todavía tenemos que articular una explicación científica sólida de la experiencia consciente. Nos falta un relato concluyente de cómo la conciencia manifiesta un mundo privado de vistas, sonidos y sensaciones. Aún no podemos responder, o al menos no con toda la fuerza, a las afirmaciones de que la conciencia está fuera de la ciencia convencional. Es improbable que el vacío se llene pronto. Casi todos los que han pensado en pensar se dan cuenta de que romper la conciencia, explicando nuestros mundos internos en términos puramente científicos, plantea uno de nuestros retos más formidables.

Isaac Newton encendió la ciencia moderna encontrando patrones en las partes de la realidad accesibles a los sentidos humanos y codificándolos en sus leyes de movimiento. En los siglos posteriores, hemos reconocido que para seguir adelante con Newton es necesario abrir tres caminos distintos: Necesitamos entender la realidad a escalas mucho más pequeñas que las consideradas por Newton, un camino que nos ha llevado a la física cuántica, que ha explicado el comportamiento de las partículas fundamentales y, entre muchas otras cosas, los procesos bioquímicos que subyacen a la vida. Necesitamos entender la realidad a escalas mucho mayores que las consideradas por Newton, un camino que nos ha llevado a la relatividad general, que ha explicado la gravedad y, entre muchas otras cosas, la formación de estrellas y planetas esenciales para el surgimiento de la vida. Y para la tercera frontera, la más laberíntica de todas, necesitamos comprender la realidad a escalas mucho más complejas que las consideradas por Newton, un camino que anticipamos que conduce a una explicación de cómo grandes colecciones de partículas pueden unirse para dar vida y generar mente.

Al entrenar su poder intelectual en problemas altamente simplificados -ignorando, por ejemplo, las estructuras internas agitadas del sol y los planetas y tratando a cada uno en cambio como una bola sólida- Newton hizo lo correcto. El arte de la ciencia, de la que Newton era el maestro, consiste en hacer simplificaciones juiciosas que hacen que los problemas sean tratables y al mismo tiempo conservan lo suficiente de su esencia para asegurar que las conclusiones extraídas sean relevantes. El desafío es que las simplificaciones efectivas para una clase de problemas pueden ser menos efectivas para otras. Modela los planetas como bolas sólidas y puedes calcular sus trayectorias con facilidad y precisión. Modela tu cabeza como una bola sólida y la comprensión de la naturaleza de la mente será menos esclarecedora. Pero para deshacerse de aproximaciones improductivas y dejar al descubierto el funcionamiento interno de un sistema que contiene tantas partículas como el cerebro, un objetivo loable, sería necesario dominar un nivel de

complejidad fantásticamente fuera del alcance de los métodos matemáticos y computacionales más sofisticados de hoy en día.

Lo que ha cambiado en los últimos años es el nuevo acceso a características observables y mensurables de la actividad cerebral que, como mínimo, acceden a procesos que acompañan de manera fiable a la experiencia consciente. Cuando los investigadores pueden usar la resonancia magnética funcional para rastrear meticulosamente el flujo sanguíneo que apoya la actividad neuronal, o insertar sondas cerebrales profundas para detectar los impulsos eléctricos que se disparan a lo largo de las neuronas individuales, o usar electroencefalogramas para monitorear las ondas electromagnéticas que se ondulan a través del cerebro, y cuando los datos revelan patrones claros que reflejan tanto el comportamiento observado como los reportes de la experiencia interna, el caso para acercarse a la conciencia como un fenómeno físico se fortalece sustancialmente. De hecho, animados por estos impresionantes avances, los investigadores audaces han considerado que ha llegado el momento de desarrollar una base científica para la experiencia consciente.

y la narración de historias

Hace algunos años, durante un intercambio bondadoso pero acalorado sobre el papel de las matemáticas en la descripción del universo, le dije enfáticamente a un presentador de televisión nocturno que no era más que un saco de partículas gobernadas por las leyes de la física. No en broma, aunque sin perder el ritmo lo convirtió en una. ("Oye, esa es una gran frase para ligar") Y no como una broma, porque en este sentido, lo que es cierto para él se aplica igualmente a mí. En cambio, el comentario surgió de mi profundo compromiso reduccionista, que sostiene la opinión de que al captar plenamente el comportamiento de los ingredientes fundamentales del universo contamos una historia rigurosa y autónoma de la realidad. No tenemos un borrador final de esta historia en mano ya que muchos problemas en la vanguardia de la investigación siguen sin resolverse, algunos de los cuales encontraremos en breve. No obstante, puedo imaginar un futuro en el que los científicos serán capaces de proporcionar una articulación matemáticamente completa de los procesos microfísicos fundamentales que subyacen a cualquier cosa que ocurra, en cualquier lugar y en cualquier momento.

Hay algo reconfortante en esta perspectiva, algo que resuena con gracia en un sentimiento de 2500 años de edad de Demócrito, "Lo dulce es dulce, lo amargo es amargo, lo caliente es caliente, lo frío es frío, el color es el color; pero en verdad sólo hay átomos y el vacío". [3] El punto es que todo surge de la misma colección de ingredientes gobernados por los mismos principios físicos. Y esos principios, como lo atestiguan algunos cientos de años de observación, experimentación y teorización, se expresarán probablemente por un puñado de símbolos dispuestos en una pequeña colección de ecuaciones matemáticas. *Ese* es un universo elegante.[4]

Por muy poderosa que sea esta descripción, sólo sería una de las muchas historias que contamos. Tenemos la capacidad de cambiar el enfoque, de restablecer la resolución, de comprometernos con el mundo en una amplia variedad de formas. Mientras que una descripción reduccionista completa proporcionaría un fundamento científico, otras

descripciones de la realidad, otras historias, proporcionan percepciones que muchos consideran más relevantes porque están más cerca de la experiencia. Contar algunas de estas historias, como ya hemos visto, requiere nuevos conceptos y lenguaje. La entropía nos ayuda a contar la historia de la aleatoriedad y la organización dentro de grandes colecciones de partículas, ya sea que estén saliendo de su horno o fusionándose en estrellas. La evolución nos ayuda a contar la historia del azar y la selección a medida que las colecciones de moléculas, vivas o no, se replican, mutan y gradualmente se adaptan mejor a su entorno.

Una historia que muchos consideran más relevante aún se centra en la conciencia. Abrazar los pensamientos, emociones y recuerdos es abrazar el núcleo de la experiencia humana. También es una historia que requiere una perspectiva cualitativamente diferente de cualquier otra que hayamos tomado hasta ahora. La entropía, la evolución y la vida pueden ser estudiadas "ahí fuera". Podemos contar completamente sus historias como relatos en tercera persona. Somos testigos de estas historias y, si somos suficientemente diligentes, nuestro relato puede ser exhaustivo. Estas historias están inscritas en libros abiertos.

Una historia que abarca la conciencia es diferente. Una historia que penetra en las sensaciones internas de la vista o el sonido, de euforia o pena, de consuelo o dolor, de facilidad o ansiedad, es una historia que se basa en un relato en primera persona. Es una historia informada por una voz interior de la conciencia que habla desde un guión personal que cada uno de nosotros parece ser el autor. No sólo experimento un mundo subjetivo, sino que tengo la sensación palpable de que desde el interior de ese mundo controlo mis acciones. Sin duda, cuando se trata de tus acciones tienes un sentido similar. Malditas sean las leyes de la física; yo pienso, por lo tanto controlo. Comprender el universo a nivel de conciencia requiere una historia que pueda lidiar con una realidad subjetiva totalmente personal y aparentemente autónoma.

Para iluminar la conciencia consciente nos encontramos así con dos desafíos distintos pero relacionados. ¿Puede la materia, por sí misma, producir las sensaciones que infunden la conciencia? ¿Puede nuestro sentido de autonomía consciente no ser más que las leyes de la física actuando por sí mismas sobre la materia que constituye el cerebro y el cuerpo? A estas preguntas, Descartes respondió con un no definitivo. En su opinión, la diferencia manifiesta entre la materia y la mente refleja una profunda división. El universo tiene cosas físicas. El universo tiene cosas de la mente. La materia física puede afectar a la materia de la mente y la materia de la mente puede afectar a la materia física. Pero los dos tipos de cosas son diferentes. En el lenguaje moderno, los átomos y las moléculas no son la materia del pensamiento.

La postura de Descartes es seductora. Puedo atestiguar que las mesas y sillas, los gatos y los perros, la hierba y los árboles son diferentes de los pensamientos dentro de mi cabeza, y sospecho que usted confirmaría un sentimiento similar. ¿Por qué las partículas que constituyen los elementos tangibles de la realidad externa y las leyes físicas que las gobiernan tendrían alguna relevancia para explicar mi mundo interior de experiencia consciente? Tal vez, entonces, deberíamos esperar que la comprensión de la conciencia no sea simplemente una historia de nivel superior, que no sea simplemente una historia que cambia su mirada de afuera hacia adentro, sino que sea un tipo de historia

fundamentalmente diferente, que requiere una revolución conceptual a la par de las de la física cuántica y la relatividad.

Estoy a favor de las revoluciones intelectuales. No hay nada más excitante que un descubrimiento que pone de cabeza la visión del mundo aceptada. Y en lo que sigue, discutiremos los trastornos que algunos investigadores de la conciencia prevén que se dirigen hacia nosotros. Pero por razones que se aclararán, sospecho que la conciencia es menos misteriosa de lo que se siente. Resonando con mi exclamación en la televisión a altas horas de la noche y, más importante aún, con un segmento de investigadores que han dedicado su vida profesional a estas cuestiones, anticipo que algún día explicaremos la conciencia con nada más que una comprensión convencional de las partículas que constituyen la materia y las leyes físicas que las gobiernan. Eso daría lugar a su propia variedad de revolución, estableciendo una hegemonía virtualmente ilimitada para la ley física, llegando arbitrariamente lejos en el mundo exterior de la realidad objetiva y arbitrariamente profundo en el mundo interior de la experiencia subjetiva.

En las sombras

No todas las funciones cerebrales comportan la reverencia que se le otorga a la conciencia. Mucha actividad neurológica está orquestada bajo la superficie de la conciencia. Al observar una puesta de sol, su cerebro procesa rápidamente los datos que llevan los trillones de fotones que golpean los fotorreceptores de sus retinas cada segundo, interpolando diligentemente la imagen para dar cuenta de sus puntos ciegos (donde, en cada ojo, su nervio óptico se conecta con la retina, llevando los datos al núcleo genético lateral de su cerebro y a la corteza visual), compensando continuamente el desplazamiento de los ojos y el movimiento de la cabeza, corrigiendo los fotones bloqueados o dispersos por las irregularidades oculares, volteando cada imagen hacia arriba, fusionando las partes de cada imagen comunes a ambos ojos, y así sucesivamente, y sin embargo, al contemplar tranquilamente los últimos rayos del sol, no es en absoluto consciente de todo lo que está sucediendo justo detrás de los ojos. Una descripción similar se mantiene al leer estas palabras. La arquitectura de la conciencia le permite centrarse en las ideas conceptuales que las palabras simbolizan, relegando el procesamiento masivo de datos visuales y lingüísticos a funciones cerebrales que pasan desapercibidas. Más innato aún, día tras día, caminas, hablas, tu corazón late, tu sangre fluye, tu estómago digiere, tus músculos se flexionan, y así sucesivamente, y todo sucede sin necesidad de que prestes la más mínima atención.

Que el cerebro está inundado de procesos influyentes que escapan a la introspección es una premisa con una larga historia, que se ha expresado en innumerables formas. Los textos védicos escritos hace tres mil años invocan una noción del inconsciente, y las referencias continúan a través de los siglos como pensadores penetrantes han conjeturado sabores de cualidades mentales no disponibles para el paladar de la conciencia consciente: San Agustín ("La mente no es lo suficientemente grande como para contenerse a sí misma: pero ¿dónde puede estar esa parte de ella que no contiene?" [5]), Tomás de Aquino ("La mente no se ve a sí misma a través de su esencia" [6]), William Shakespeare ("Ve a tu seno, / llama allí, y

pregunta a tu corazón lo que sabe" [7]), Gottfried Leibniz ("La música es el ejercicio aritmético oculto de una mente inconsciente que está calculando" [8]). También son intrigantes los procesos que *parecen residir* bajo el radar y sin embargo generan ecos accesibles al procesamiento consciente. Abundan las historias, por ejemplo, de la mente inconsciente resolviendo problemas y entregando las soluciones sin ser invitada. Una de las más coloridas proviene del farmacólogo alemán Otto Loewi, quien durante la noche antes del Domingo de Pascua de 1921 se despertó brevemente y garabateó una idea que acababa de llegarle en un sueño. Por la mañana, Loewi tuvo la abrumadora sensación de que la nota nocturna contenía una visión vital, pero por mucho que lo intentara no fue capaz de descifrarla. La noche siguiente tuvo el mismo sueño, pero esta vez fue inmediatamente al laboratorio y siguió las instrucciones del sueño para llevar a cabo un experimento que probaba su antigua hipótesis de que los procesos químicos, no los eléctricos, son fundamentales para la comunicación celular. Para el lunes, el experimento inspirado en el sueño estaba hecho, y su éxito llevaría finalmente a Loewi a ganar el Premio Nobel.[9]

La cultura popular tiende a entrelazar el funcionamiento subterráneo de la mente con las contribuciones de Sigmund Freud (a pesar de un grupo de científicos que años antes habían perseguido ideas relacionadas [10]) y las corrientes subterráneas de recuerdos reprimidos, deseos, conflictos, fobias y complejos que él concibió como un choque entre el comportamiento humano y el resto. La gran diferencia en los tiempos modernos es que las especulaciones, corazonadas e intuiciones sobre la vida de la mente ahora se enfrentan a datos que antes no estaban disponibles. Los investigadores han desarrollado formas inteligentes de mirar por encima del hombro de la mente y rastrear la actividad cerebral que se encuentra por debajo del nivel de conciencia.

Algunos de los estudios más sorprendentes involucran a pacientes que han perdido algún grado de función neurológica. Un caso muy conocido, que involucra a un sujeto conocido como P.S. que sufrió un daño cerebral derecho, fue documentado a finales de la década de 1980 por Peter Halligan y John Marshall. [11] Como se anticipó con este tipo de deterioro, P.S. no reportaría detalles en el extremo izquierdo de ninguna imagen que se le mostrara. Afirmaba, por ejemplo, que dos dibujos de líneas verdes oscuras de una casa eran idénticos, aunque el lado izquierdo de una de las casas estaba siendo consumido por un intenso fuego rojo. Sin embargo, cuando se le preguntó cuál de las dos casas prefería llamar hogar, P.S. consistentemente escogió la casa que no estaba ardiendo. Los investigadores argumentaron que aunque P.S. no pudo adquirir conciencia del fuego, la información había entrado encubierta y estaba influyendo en su decisión desde detrás de la escena.

Los cerebros sanos también revelan su propia dependencia de influencias ocultas. Los psicólogos han establecido que incluso si se presta mucha atención, una imagen que aparece en la pantalla durante menos de cuarenta milisegundos (y que se encuentra entre destellos algo más largos de otras imágenes conocidas como máscaras) no logrará entrar en la conciencia consciente. Sin embargo, tales imágenes subliminales pueden influir en las decisiones conscientes. La famosa afirmación de un aumento en el consumo de refrescos causado por imágenes subliminales de "Bebe Coca-Cola" que se proyectan en los cines es un mito urbano propagado a finales del decenio de 1950 por un investigador de mercado en apuros. [12] Pero inteligentes estudios de laboratorio han proporcionado pruebas convincentes

de tipos específicos de procesos mentales clandestinos. [13] Por ejemplo, imagina que estás frente a una pantalla en la que se muestran números, cada uno entre 1 y 9, y tu tarea es clasificar rápidamente cada uno como más grande o más pequeño que 5. Sus tiempos de reacción serán más rápidos cuando un número dado esté precedido por un destello subliminal de un dígito que se encuentre en el mismo lado de 5 que el número dado (por ejemplo, cuando un 4 esté precedido por un 3 subliminal). Por el contrario, los tiempos de reacción serán más lentos cuando un número dado esté precedido por un destello subliminal de un dígito situado en el lado opuesto del 5 como número dado (por ejemplo, cuando un 4 esté precedido por un 7 subliminal). [14] Aunque no seas consciente de los fugaces camafeos numéricos, éstos han pasado por tu cerebro e impactado en tu respuesta.

El resultado es que tu cerebro coordina subrepticiamente una maravilla regulatoria, funcional y de minería de datos. Aunque estas actividades cerebrales son maravillosas, no constituyen un misterio conceptual. El cerebro envía y recibe rápidamente señales a lo largo de las fibras nerviosas, permitiéndole controlar los procesos biológicos y generar respuestas de comportamiento. Para delinear las vías neuronales precisas y los detalles fisiológicos que subyacen a tales funciones y comportamientos, los científicos se enfrentan a la desalentadora tarea de trazar vastos territorios densos con complejos circuitos biológicos con un nivel de precisión muy superior al que se ha logrado hasta ahora. Aún así, todo lo que estamos aprendiendo sugiere que por muy desafiante que sea, por muy vastas que sean las reservas de creatividad y diligencia requeridas, hay muchas razones para creer que las estrategias familiares de la ciencia prevalecerán.

Y si no fuera por una molestosa cualidad de la mente, eso sería todo. Pero cuando miramos más allá de las tareas de la mente y consideramos en su lugar las sensaciones de la mente -la experiencia interior que identificamos como la esencia del ser humano- algunos investigadores han llegado a un pronóstico diferente y mucho menos optimista en cuanto a la capacidad de la ciencia tradicional para proporcionar una visión. Esto nos lleva a lo que algunos llaman el "duro problema" de la conciencia.

El problema difícil

En una carta a Henry Oldenburg, uno de los más prolíficos corresponsales durante los años de formación de la ciencia moderna, Isaac Newton señaló, "Determinar más absolutamente, qué es la Luz... y por qué modos o acciones produce en nuestras mentes los Fantasmas de Colores, no es tan fácil. Y no mezclaré conjeturas con certezas." [15] Newton luchaba por explicar la más común de las experiencias: la sensación interna de uno u otro color. Considere un plátano. No es gran cosa, por supuesto, mirar un plátano y determinar que es amarillo. Si tienes la aplicación correcta, tu teléfono puede hacerlo. Pero hasta donde sabemos, cuando tu teléfono informa que la banana es amarilla, el teléfono no tiene una sensación interna de amarillo. No tiene una sensación interna de amarillo. No ve el amarillo en el ojo de su mente. Tú sí. Yo también. Al igual que Newton. Su problema era entender cómo en el mundo hacemos esto.

El predicamento es relevante mucho más allá de los "fantasmas" mentales de amarillo o azul o verde. Mientras escribo estas palabras, comiendo palomitas de maíz, con la música sonando suavemente de fondo, siento una serie de experiencias internas: la presión en la punta de los dedos, un regusto salado, las magníficas voces de Pentatonix, un monólogo mental negociando la siguiente frase de esta frase. Tu mundo interior está absorbiendo estas palabras, quizás escuchándolas con la voz interior de tu mente, mientras que quizás también te sientes distraído por ese último trozo de pastel de chocolate en el refrigerador. El punto es que nuestras mentes albergan una gama de sensaciones internas -pensamientos, emociones, recuerdos, imágenes, deseos, sonidos, olores y más- que son parte de lo que entendemos por conciencia. [16] Al igual que con Newton y el plátano, el reto es determinar cómo nuestro cerebro crea y sostiene estos mundos vibrantes de experiencia subjetiva.

Para comprender la profundidad del rompecabezas, imagina que estás dotado de una visión sobrehumana que te permite mirar dentro de mi cerebro y ver cada una de sus aproximadamente mil billones de billones de partículas -electrones, protones y neutrones- que saltan y se agitan, atraen y repelen, fluyen y se dispersan. [17] A diferencia de las grandes colecciones de partículas a la deriva de hornear pan o las que se unen en una estrella, las partículas que constituyen un cerebro están dispuestas en un patrón altamente organizado. Aún así, si nos centramos en una de estas partículas, veremos que interactúa con otras a través de las mismas fuerzas descritas por las mismas matemáticas, ya sea que esa partícula esté flotando en su cocina, en la corona de la Estrella Polar o en el interior de mi corteza prefrontal. Y dentro de esa descripción matemática, afirmada por décadas de datos de colisionadores de partículas y poderosos telescopios, no hay nada que incluso insinúe las experiencias internas que esas partículas generan de alguna manera. ¿Cómo puede una colección de partículas sin sentido, sin pensamiento, sin emoción, unirse y producir sensaciones internas de color o sonido, de euforia o maravilla, de confusión o sorpresa? Las partículas pueden tener masa, carga eléctrica y un puñado de otras características similares (cargas nucleares, que son versiones más exóticas de la carga eléctrica), pero todas estas cualidades parecen completamente desconectadas de cualquier cosa remotamente similar a la experiencia subjetiva. ¿Cómo entonces un remolino de partículas dentro de una cabeza -que es todo lo que es un cerebro- crea impresiones, sensaciones y sentimientos?

El filósofo Thomas Nagel dio un relato icónico y particularmente evocador de la brecha explicativa. [18] ¿Cómo es, preguntó, ser un murciélago? Imagínatelo: En lo alto de un lecho de aire mientras se eleva a través de un paisaje oscuro, grita con un incesante patrón de chasquidos, generando ecos de árboles, rocas e insectos, que le permiten trazar un mapa del entorno. Por el sonido reflejado te das cuenta de que un mosquito está adelante y se dirige hacia la derecha, así que te lanzas y disfrutas de un pequeño bocado. Dado que nuestro modo de compromiso con el mundo es profundamente diferente, hay tanto que nuestra imaginación puede llevarnos al mundo interior del murciélago. Incluso si tuviéramos un recuento completo de toda la física fundamental subyacente, la química y la biología que hacen de un murciélago un murciélago, nuestra descripción seguiría pareciendo incapaz de llegar a la experiencia subjetiva de "primera persona" del murciélago. Por muy detallada que sea nuestra comprensión material, el mundo interior del murciélago parece inalcanzable.

Lo que es cierto para el murciélago es cierto para cada uno de nosotros. Son un enjambre de partículas que interactúan. Yo también. Y aunque entiendo cómo sus partículas pueden resultar en su informe de haber visto el color amarillo - las partículas en su tracto vocal, boca y labios sólo necesitan coreografiar sus movimientos para producir ese comportamiento externo - me es mucho más difícil entender cómo las partículas le proporcionan la experiencia interior subjetiva del amarillo. Mientras que entiendo cómo las partículas pueden hacerte sonreír o fruncir el ceño, las partículas sólo necesitan coreografiar sus movimientos apropiadamente. De hecho, aunque tengo acceso directo a mi propio mundo interior, estoy igualmente perdido para entender cómo ese mundo emerge del movimiento y la interacción de mis propias partículas.

Yo también me quedaría estancado, por supuesto, en tratar de explicar muchas otras cosas en términos reduccionistas, desde los tifones del Pacífico hasta los volcanes enfurecidos. Pero el desafío que presentan estos sucesos, y un mundo lleno de ejemplos como ellos, es únicamente el de describir la compleja dinámica de un número

fantásticamente grande de partículas. Si pudiéramos superar ese obstáculo técnico, estaríamos acabados. [19] Y eso es porque no hay una sensación interior de "lo que es ser" un tifón o un volcán. Los tifones y los volcanes, hasta donde sabemos, no tienen mundos subjetivos de experiencia interna. No nos faltan los relatos en primera persona. Pero para cualquier cosa consciente, eso es precisamente lo que le falta a nuestra descripción objetiva de terceros.

En 1994 David Chalmers, un joven filósofo australiano, con el pelo pasando por sus hombros, subió al escenario en la conferencia anual de la conciencia en Tucson y describió este déficit como el "duro problema" de la conciencia. No es que el problema "fácil" -entender la mecánica de los procesos cerebrales y su papel en la impresión de los recuerdos, la respuesta a los estímulos y el moldeado del comportamiento - sea fácil. Es sólo que podemos imaginar cómo sería la forma de una solución a este tipo de problemas; podemos articular un enfoque en principio a nivel de partículas o estructuras más complejas como las células y los nervios, que parece coherente. El desafío de imaginar tal solución para la conciencia motivó la evaluación de Chalmers. Sostuvo que no sólo nos falta un puente entre las partículas sin conciencia y la experiencia consciente, sino que si tratamos de construirlo utilizando un plan reduccionista -utilizando las partículas y las leyes que constituyen la base fundamental de la ciencia tal como la conocemos- fracasaremos.

La evaluación dio un acorde -congruente para algunos, disonante para otros- que ha estado resonando a través de la investigación de la conciencia desde entonces.

Algo sobre María

Es fácil ser impertinente sobre el problema difícil. En el pasado, mi propia respuesta puede haber parecido así. Cuando me preguntan, a menudo diría que la experiencia consciente es simplemente lo que se siente cuando un cierto tipo de procesamiento de información tiene lugar en el cerebro. Pero como la cuestión central es explicar cómo puede haber un "cómo se siente" en absoluto, la respuesta descarta demasiado rápido el problema difícil como si no fuera difícil y ni siquiera fuera un problema. Más caritativamente, es una respuesta que se pone del lado de una visión muy extendida que piensa demasiado en el pensamiento. Mientras que algunos aficionados a los problemas difíciles argumentan que para comprender la conciencia tendremos que introducir conceptos de fuera de la ciencia convencional, otros -los llamados *fisicalistas- anticipan* que los métodos científicos tradicionales, interpretados inteligentemente y aplicados creativamente, invocando únicamente las propiedades físicas de la materia, estarán a la altura de la tarea. La perspectiva fisicalista resume, en efecto, mi propia visión de larga data.

Sin embargo, a lo largo de los años, mientras pensaba en la cuestión de la conciencia más cuidadosamente, he tenido momentos significativos de duda. El más sorprendente fue cuando encontré un argumento influyente que el filósofo Frank Jackson planteó una década antes de que el duro problema fuera etiquetado como duro. [20] Jackson cuenta una simple historia que, suavemente dramatizada, dice así. Imaginen que en el futuro lejano hay una chica brillante, Mary, que es profundamente daltónica. Desde su nacimiento, todo en su mundo ha aparecido sólo en blanco y negro. Su condición desconcierta a los médicos más renombrados, y por eso Mary decide que le corresponde a ella averiguarlo. Impulsada por el sueño de curar su déficit, María emprende años de estudio intensivo, observación y experimentación. Y a través de todo ello, Mary se convierte en la más grande neurocientífica que el mundo ha conocido, alcanzando una meta que la humanidad ha eludido durante mucho tiempo: desentrañar completamente hasta el último detalle sobre la estructura, función, fisiología, química, biología y física del cerebro. Domina absolutamente todo lo que hay que saber sobre el funcionamiento del cerebro, tanto su organización global como sus procesos microfísicos. Ella entiende todos los disparos neuronales y las cascadas de partículas que suceden cuando nos maravillamos ante un rico cielo azul, disfrutamos de una suculenta ciruela o nos perdemos en la Tercera Sinfonía de Brahms.

Con este logro, Mary es capaz de identificar la cura para su discapacidad visual, y se somete al procedimiento quirúrgico para corregirla. Meses después los médicos están listos para quitarle las vendas, y Mary se prepara para tomar el mundo de nuevo. Parada frente a un ramo de rosas rojas, Mary abre lentamente los ojos. Esta es la pregunta: A partir de esta primera experiencia con el color rojo, ¿aprenderá Mary algo nuevo? Al tener finalmente la experiencia interna del color, ¿adquirirá una nueva comprensión?

Al reproducir esta historia en tu mente, parece obvio que la primera vez que María experimente la sensación interior de rojo se verá abrumada. ¿Sorprendida? Sí. ¿Emocionada? Sí, claro. ¿Tocada? Profundamente. Parece evidente que esta primera experiencia directa con el color ampliará su comprensión de la percepción humana y la respuesta interna que puede generar. A partir de esta intuición común, Jackson nos anima a considerar la implicación. Mary había dominado todo lo que hay que saber sobre el funcionamiento físico del cerebro. Y sin embargo, a través de este único encuentro, ella aparentemente ha expandido ese conocimiento. Ha adquirido conocimiento de la experiencia consciente que acompaña a la respuesta del cerebro al color rojo. ¿La conclusión? *El conocimiento completo del funcionamiento físico del cerebro deja algo fuera.* No logra exponer o explicar las sensaciones subjetivas. Si tal conocimiento físico fuera integral, María se habría quitado las vendas y se habría encogido de hombros.

Cuando leí por primera vez este relato, sentí un parentesco repentino con María, como si también me hubieran hecho una cirugía correctiva que abrió una ventana previamente oscurecida sobre la naturaleza de la conciencia. Mi confianza en que los procesos físicos en el cerebro *son la conciencia,* que la conciencia *es* la sensación de tales procesos, fue sacudida de repente. María poseía todo el conocimiento posible de todos los procesos físicos del cerebro y, sin embargo, desde el escenario parece claro que tal comprensión es incompleta. Esto sugiere que cuando se trata de la experiencia consciente, los procesos

físicos son parte de la historia pero no la historia completa. Cuando el artículo de Jackson apareció por primera vez, mucho antes de que yo lo encontrara, los expertos también se entusiasmaron, y en las décadas siguientes Mary ha provocado mucha respuesta.

El filósofo Daniel Dennett nos pide que consideremos la implicación del conocimiento exhaustivo de María de los hechos físicos. Su punto es que el concepto de comprensión física completa es tan completamente extraño que subestimamos enormemente el poder explicativo que proporcionaría. Con una comprensión tan completa, desde la física de la luz a la bioquímica de los ojos y la neurociencia del cerebro, Dennett argumenta que María *sería capaz* de discernir la sensación interna del rojo mucho antes de experimentarla. [21] Quítese las vendas y María podrá responder a la belleza de las rosas rojas, pero ver su color rojo simplemente confirmará sus expectativas. Los filósofos David Lewis [22] y Laurence Nemirow [23] toman un rumbo diferente, argumentando que María adquiere una nueva habilidad - identificar, recordar e imaginar la experiencia interior del rojo - pero eso no constituye un nuevo hecho que quede fuera de su anterior dominio. Al quitarse las vendas, María no se encoge de hombros, pero el "guau" que puede pronunciar habla sólo de su deleite por una nueva manera de reflexionar sobre el viejo conocimiento. Incluso el mismo Jackson ahora argumenta en contra de su conclusión original, habiendo sufrido un cambio de corazón después de años de contemplar a María. Estamos tan acostumbrados a aprender cosas sobre el mundo a través de la experiencia directa, como captar lo que se siente al sentir el rojo al ver el rojo, que asumimos tácitamente que estas experiencias proporcionan el único medio para adquirir tal conocimiento. Según Jackson, eso no está justificado. Mientras que el proceso de aprendizaje de Mary sería desconocido, invocando el razonamiento deductivo cuando la gente más ordinaria confía en la experiencia directa, su completo dominio del conocimiento físico le permitiría determinar lo que se siente al ver el rojo.[24]

¿Quién tiene razón? ¿El Jackson original y los seguidores de su primera incursión? ¿O los Jackson posteriores y todos los que están convencidos de que al ver las rosas Mary no aprende nada nuevo?

Hay mucho en juego. Si la conciencia puede ser explicada por hechos sobre las fuerzas físicas del mundo que actúan sobre sus constituyentes materiales, nuestra tarea será determinar cómo. Si no, nuestra carga será más amplia. Necesitaremos determinar los nuevos conceptos y procesos que requiere la comprensión de la conciencia, un viaje que casi seguro nos llevará más allá de los límites actuales de la ciencia.

Históricamente, hemos navegado con confianza a través de las agitadas aguas de la intuición humana identificando las consecuencias comprobables de los puntos de vista en conflicto. Hasta ahora, nadie ha propuesto un experimento o una observación o un cálculo que pueda resolver definitivamente la cuestión planteada por la historia de María o, más ambiciosamente, revelar la fuente de la experiencia interior. En su mayor parte, las consideraciones que tenemos para adjudicar entre esas perspectivas que pasan la prueba básica son la plausibilidad y el atractivo intuitivo, medidas flexibles que, como veremos, han permitido una colección diversa de puntos de vista.

Un cuento de dos historias

Las estrategias para explicar la conciencia se despliegan a través de un impresionante terreno de ideas. En los extremos hay posiciones que o bien desestiman la conciencia como una ilusión *(eliminativismo)* o declaran que la conciencia es la única cualidad del mundo que es real *(idealismo)*. En el medio, encontramos un espectro de propuestas. Algunas operan dentro de los límites del pensamiento científico tradicional, otras se deslizan entre las grietas de la comprensión científica actual, y otras todavía aumentan las cualidades que hemos mantenido durante mucho tiempo para definir la realidad en su nivel más fundamental. Dos relatos breves proporcionan a estas propuestas un contexto histórico.

Si hubiera escuchado las discusiones en los círculos biológicos durante los siglos XVIII y XIX, estaría familiarizado con el *vitalismo*. Era un concepto que abordaba lo que podríamos haber llamado el "duro problema" de la vida: Dado que los ingredientes fundamentales del mundo son inanimados, ¿cómo es posible que las colecciones de tales ingredientes estén vivas? La respuesta del vitalismo, descarnada y directa, era que tales colecciones no pueden estar vivas. Al menos no por sí mismas. El vitalismo propuso que el ingrediente que faltaba era una chispa no física o una fuerza de vida que dotara a la materia inanimada de la magia de la vida.

Si se hubiera movido en círculos de física en particular durante el siglo XIX, habría oído hablar con entusiasmo de la electricidad y el magnetismo mientras Michael Faraday y otros se adentraban cada vez más en este reino cada vez más intrigante. Una perspectiva que habrías encontrado argumentaba que estos nuevos fenómenos podían ser explicados dentro del enfoque mecanicista estándar de la ciencia transmitido por Isaac Newton. Encontrar la combinación inteligente de fluidos fluidos fluidos y engranajes y ruedas en miniatura responsables de los nuevos fenómenos podría ser un desafío, pero la base para la comprensión ya estaba en la mano. Debido a la adecuación anticipada del razonamiento científico convencional, se podría haber llamado a esto el "problema fácil" de la electricidad y el magnetismo.

La historia ha revelado que las expectativas descritas en cada uno de estos cuentos fueron equivocadas. Con dos siglos de retrospectiva, el enigma casi místico que la vida una vez conjuró ha disminuido. Aunque todavía carecemos de una comprensión completa del origen de la vida, hay un consenso científico casi universal de que no se necesita una chispa mágica. Las partículas configuradas en una jerarquía de estructuras - átomos, moléculas, orgánulos, células, tejidos, etc. - son todo lo que se necesita. Las pruebas favorecen fuertemente el marco existente de la física, la química y la biología como plenamente suficiente para explicar la vida. El difícil problema de la vida, aunque seguramente difícil, ha sido reclasificado como fácil.

En cuanto a la electricidad y el magnetismo, los datos recogidos en cuidadosos experimentos exigían que los científicos fueran más allá de las características de la realidad física que estaban en los libros antes del siglo XIX. La comprensión existente dio paso a una calidad física totalmente nueva de la materia (carga eléctrica) que respondía a un tipo de influencia totalmente nuevo (campos eléctricos y magnéticos que llenaban el espacio) descrito por un conjunto de ecuaciones totalmente nuevo (veinte de esas ecuaciones en la

formulación inicial) desarrollado por James Clerk Maxwell. Aunque resuelto, el "fácil" problema de la electricidad y el magnetismo resultó ser difícil.[25]

Muchos investigadores prevén que la historia del vitalismo se recapitulará con la conciencia: a medida que ganemos una comprensión cada vez más profunda del cerebro, el difícil problema de la conciencia se irá evaporando lentamente. Aunque actualmente es misterioso, la experiencia interior se verá gradualmente como una consecuencia directa de las actividades fisiológicas del cerebro. Lo que nos falta es un dominio total del funcionamiento interno del cerebro, no una nueva variedad de cosas de la mente. Un día, según esta perspectiva fisicalista, la gente sonreirá al recordar cómo una vez investimos la conciencia con un misterio tan apasionado pero injustificado.

Otros prevén que el relato del electromagnetismo proporciona el modelo relevante para la conciencia. Cuando tu comprensión del mundo se enfrenta a hechos desconcertantes, naturalmente tratas de incorporarlos dentro del marco científico existente. Pero algunos hechos pueden no encajar en las plantillas existentes. Algunos hechos pueden revelar nuevas cualidades de la realidad. La conciencia, según este campo, abunda en hechos de este tipo. Si esta perspectiva resulta ser correcta, la comprensión de la experiencia subjetiva requerirá una reconfiguración sustancial del campo de juego intelectual, con el potencial de profundas ramificaciones que pueden tener un impacto mucho más allá de las cuestiones de la mente.

Una de las propuestas más radicales es la de David Chalmers, el mismísimo Sr. Problema Duro.

Teorías de todo

Chalmers, convencido de que la conciencia no puede surgir de un remolino de partículas sin sentido, nos anima a tomarnos en serio el cuento del electromagnetismo. Así como los físicos del siglo XIX se enfrentaron valientemente a la inutilidad de elaborar explicaciones tensas de los fenómenos electromagnéticos utilizando la ciencia convencional de la época, nosotros necesitamos el mismo coraje para reconocer que para desmitificar la conciencia debemos mirar más allá de las cualidades físicas conocidas.

¿Pero cómo? Una posibilidad, simple y audaz, es que las partículas individuales están dotadas de un atributo innato de la conciencia -llamémosla *protoconciencia* para evitar las imágenes de electrones eufóricos o quarks irritables- que no puede describirse en términos de algo más fundamental. Es decir, nuestra descripción de la realidad debe ampliarse para incluir una cualidad subjetiva intrínseca e irreducible que se infunde en los ingredientes materiales elementales de la naturaleza. Y es esta cualidad de la materia la que hemos pasado por alto durante mucho tiempo, por lo que hasta ahora no hemos podido explicar la base física de la experiencia consciente. ¿Cómo puede un remolino de partículas sin mente crear la mente? No pueden. Para crear una mente consciente necesitas un remolino de partículas conscientes. Al unir sus cualidades protoconscientes, una gran colección de partículas puede producir una experiencia consciente familiar. La propuesta, entonces, es que las partículas estén dotadas de una colección bien estudiada de propiedades físicas (masa, carga eléctrica, cargas nucleares y giro mecánico cuántico) así como de la calidad

previamente descuidada de la protoconciencia. Reviviendo las creencias pan-psiquistas, cuyas raíces históricas se remontan a la antigua Grecia, Chalmers considera así la posibilidad de que la conciencia es relevante para todo lo que está hecho de partículas, ya sea el cerebro de un murciélago o un bate de béisbol.

Si te preguntas qué es realmente la protoconciencia o cómo se infunde en una partícula, tu curiosidad es loable, pero tus preguntas están más allá de lo que Chalmers o cualquier otra persona puede responder. A pesar de eso, es útil ver estas preguntas en su contexto. Si me hicieras preguntas similares sobre la masa o la carga eléctrica, probablemente te irías igual de insatisfecho. No sé qué es la masa. No sé qué es la carga eléctrica. Lo que sí sé es que la masa produce y responde a una fuerza gravitatoria, y la carga eléctrica produce y responde a una fuerza electromagnética. Así que aunque no puedo decirte cuáles *son* estas características de las partículas, puedo decirte lo que *hacen* estas características. En la misma línea, tal vez los investigadores no puedan delinear lo que es la protoconciencia y, sin embargo, tengan éxito en el desarrollo de una teoría de lo que hace, cómo produce y responde a la conciencia. En cuanto a las influencias gravitatorias y electromagnéticas, cualquier preocupación de que la sustitución de la acción y la respuesta por una definición intrínseca equivale a una prestidigitación intelectual se ve aliviada, para la mayoría de los investigadores, por las predicciones espectacularmente exactas que podemos extraer de nuestras teorías matemáticas de estas dos fuerzas. Tal vez algún día tengamos una teoría matemática de la protoconciencia que pueda hacer predicciones igualmente exitosas. Por ahora, no la tenemos.

Por exótico que todo esto suene, Chalmers argumenta que su enfoque se encuentra dentro de los límites de la ciencia, correctamente interpretado. Durante siglos, los científicos se han centrado exclusivamente en el desarrollo objetivo de la realidad, y con eso como objetivo desarrollaron ecuaciones que hacen un maravilloso trabajo de explicación de los datos experimentales y de observación. Pero tales datos están totalmente disponibles para una revisión en tercera persona. Chalmers está sugiriendo que hay otros datos, los datos de la experiencia interna, y presumiblemente otras ecuaciones también, que capturan el patrón y la regularidad en el dominio interno. La ciencia convencional explicaría así los datos externos mientras que la próxima era de la ciencia explicaría los datos internos.

Dicho de una manera ligeramente diferente, durante muchos años ha habido un movimiento en marcha, a menudo atribuido al físico John Wheeler (conocido por el público por popularizar el término "agujeros negros"), que prevé la información como la más fundamental de todas las monedas físicas. Para describir el estado del mundo actual, proporciono información que especifica la configuración de todas las partículas danzantes y campos ondulantes que permean el espacio. Las leyes de la física toman esa información como información de entrada y la ceden como información de salida que delinea el estado del mundo más adelante. La física, de acuerdo con este marco, está en el negocio del procesamiento de información.

Usando este lenguaje, la propuesta de Chalmers es que hay dos lados de la información: Existe la calidad objetiva y accesible a terceros de la información - la información que,

durante cientos de años, ha sido la competencia de la física convencional. También hay una calidad subjetiva, accesible en primera persona, de la información que la física no ha considerado hasta ahora. Una teoría completa de la física necesitaría abarcar no sólo la información externa sino también la interna y necesitaría leyes que describieran la evolución dinámica de cada tipo. El procesamiento de la información interna proporcionaría la base física de la experiencia consciente.

El sueño de Einstein de una teoría unificada de la física, una capaz de describir todas las partículas y fuerzas de la naturaleza dentro de un solo formalismo matemático, ha sido llamado la búsqueda de una teoría del todo. Esa desafortunada descripción rimbombante, a menudo aplicada a mi propio campo de la teoría de cuerdas, explica por qué se me pide tan a menudo mi opinión sobre la conciencia. Después de todo, la conciencia parece encajar cómodamente en una teoría que puede explicarlo *todo.* Sin embargo, como he dicho a menudo a los que me han preguntado, una cosa es comprender la física de las partículas elementales y otra muy distinta es utilizarla para comprender la mente humana. Construir el aparato científico para conectar las diferentes escalas, tanto en tamaño como en complejidad, es uno de los retos científicos más difíciles. Sin embargo, si Chalmers tiene razón, la conciencia entraría en la cuenta científica en la planta baja, al nivel de las ecuaciones fundamentales y los componentes primitivos. Lo que significa que algún día podríamos tener una comprensión que incorpore desde el principio los lados externos e internos del proceso de información: procesos físicos objetivos y experiencias conscientes subjetivas. *Eso* sería una teoría unificada. Seguiría resistiendo a la locución "teoría del todo" -espero que a los científicos les costaría mucho trabajo predecir lo que voy a desayunar mañana- pero tal comprensión sería revolucionaria.

¿Es esta la dirección correcta? Estaría encantado si lo fuera. Estaríamos en la frontera de un nuevo terreno de la realidad esperando ser explorado. Pero como usted probablemente ha supuesto, hay un gran escepticismo de que en su esfuerzo por encontrar la fuente de la conciencia, la ciencia tendrá que viajar a tierras tan exóticas. El famoso dictado de Carl Sagan de que las afirmaciones extraordinarias requieren pruebas extraordinarias es una guía apropiada. *Hay pruebas abrumadoras* de algo extraordinario - nuestras experiencias internas - pero mucho menos convincentes de que estas experiencias están más allá del alcance explicativo de la ciencia convencional.

La comprensión se profundizaría si pudiéramos identificar las condiciones físicas requeridas para generar experiencias subjetivas, una tarea central de la teoría de la conciencia que ahora consideramos.

La mente integra la información

Que el cerebro es una colección de células almenadas y húmedas que procesan la información no es controvertido. Los escáneres cerebrales y las sondas invasivas han establecido que las distintas partes del cerebro se especializan en el procesamiento de determinados tipos de información: óptica, auditiva, olfativa, lingüística, etc. [26] Sin embargo, por sí mismo, el procesamiento de la información no capta las cualidades distintivas del cerebro. Muchos sistemas físicos procesan información, desde el ábaco hasta

el termostato y la computadora, y teniendo en cuenta la perspectiva de Wheeler, existe un sentido en el que todos y cada uno de los sistemas físicos pueden ser considerados como un procesador de información. Entonces, ¿qué distingue la variedad de procesamiento de información que da como resultado la conciencia consciente? Esta es una pregunta que guía al psiquiatra y neurocientífico Giulio Tononi, al que se ha unido el neurocientífico Christof Koch. Ha llevado a un enfoque llamado teoría de *la información integrada*.[27]

Para tener una idea de la teoría, imagina que te presento un nuevo Ferrari rojo. Independientemente de si eres un fanático de los autos deportivos de alta gama, el encuentro estimula tu cerebro con una gran cantidad de datos sensoriales. La información que expresa las cualidades visuales, táctiles y olfativas del coche, así como connotaciones más abstractas desde el poder del coche en la carretera hasta las asociaciones de lujo y riqueza, se entrelazan inmediatamente en una experiencia cognitiva unificada. Es una experiencia cuyo contenido de información Tononi caracterizaría como *altamente integrada*. Incluso enfocándose más estrechamente en el color del coche, note que su experiencia no es decididamente la de un Ferrari incoloro que su mente posteriormente pinta de rojo. Tampoco es de un ambiente abstracto rojo que tu mente posteriormente moldea en un Ferrari. Aunque la información de forma y la información de color activan diferentes partes del córtex visual, su experiencia consciente de la forma y el color de Ferrari son inseparables. Los experimentas como uno solo. Esto, según Tononi, es una cualidad intrínseca de la conciencia: la información que se enhebra a través de la experiencia consciente está estrechamente unida.

Una segunda cualidad intrínseca de la conciencia es que la gama de cosas que eres capaz de mantener en tu mente es enorme. Desde un vertiginoso conjunto de experiencias sensoriales, a la agitación de la imaginación, a la planificación y el pensamiento abstractos y la preocupación y la anticipación, usted tiene un repertorio mental prácticamente ilimitado. Lo que significa que cuando tu mente está enfocada en una experiencia consciente en particular, como el Ferrari rojo, está altamente diferenciada de la gran mayoría de otras experiencias mentales que podrías estar teniendo. La propuesta de Tononi eleva estas observaciones a una caracterización definitoria: *la conciencia consciente es una información altamente integrada y altamente diferenciada.*

La mayoría de la información carece de estas cualidades. Tome una fotografía del Ferrari rojo y considere el archivo digital resultante. Para mantener las cosas simples, no se preocupe por detalles como la compresión de la imagen, y en su lugar imagine que el archivo es un conjunto de números cuyos valores registran la información de color y brillo para cada píxel de la imagen. Estos números son generados por fotodiodos en su cámara respondiendo a la luz que se refleja en distintos lugares de la superficie del coche. ¿Qué tan integrada está la información? Debido a que la respuesta de cada fotodiodo es independiente de la de los demás -no hay comunicación ni vínculo entre ellos- la información en el archivo digital está completamente balcanizada. Podrías almacenar el dato de cada píxel en un archivo separado y el contenido total de la información permanecería sin cambios. Lo que significa que no hay ninguna integración de la información en absoluto. ¿Qué tan diferenciada es la información en el archivo digital? Mientras que hay un gran surtido de posibles imágenes que el archivo digital de una cámara

puede almacenar, el contenido de la información está restringido a un conjunto fijo de números independientes. Eso es todo. Un archivo fotográfico digital no se crea para contemplar la ética de la pena capital o luchar con la prueba del último teorema de Fermat. En este sentido, el contenido de la información es extremadamente limitado, lo que significa que la cámara no es un gran anotador cuando se trata de la diferenciación de la información.

Y así, a medida que su cerebro construye una representación mental, su contenido de información se integra y se diferencia rápidamente, pero a medida que la cámara construye una fotografía digital, su información no adquiere ninguna de estas características. Eso, según Tononi, es por lo que tienes una experiencia consciente del Ferrari pero tu cámara digital no.

Con el fin de que estas consideraciones sean cuantitativas, Tononi ha propuesto una fórmula que asigna un valor numérico a la información contenida en un sistema determinado, que suele denominarse ϕ, con valores más grandes de ϕ que indican una mayor diferenciación y una integración más profunda y, por lo tanto, según la teoría, un mayor nivel de conciencia. Así pues, el enfoque presenta un continuo que va desde los sistemas simples, con menos integración y diferenciación de la información que pueden experimentar formas rudimentarias de conciencia, hasta los sistemas más complejos como usted y yo, con suficiente integración y diferenciación para dar el nivel familiar de conciencia consciente, hasta la posibilidad de otros sistemas cuyas capacidades informativas-y experiencia consciente-podrían superar las nuestras.

Al igual que el enfoque de Chalmers, la teoría de Tononi tiene una inclinación panpsiquista. Nada en la propuesta está intrínsecamente ligado a una estructura física en particular. Su experiencia de conciencia reside en un cerebro biológico, pero según Tononi y sus matemáticas, un valor suficientemente alto de ϕ, ya sea que esté contenido en sinapsis neuronales o en estrellas de neutrones, sería consciente. Para algunos, como el científico informático Scott Aaronson, esto deja la propuesta abierta a lo que él considera un ataque devastador. Los cálculos de Aaronson han demostrado que al enlazar inteligentemente puertas lógicas simples (el más básico de los interruptores electrónicos), la red resultante puede tener valores de ϕ tan grandes como se quiera, a la par con la del cerebro humano o incluso mayores. [28] De acuerdo con la teoría, la red de interruptores debería ser consciente. Y esa es una conclusión que Aaronson, y la intuición de la mayoría de la gente, considera absurda.
¿La respuesta de Tononi? Por extraña y desconocida que sea la conclusión, la red *será consciente*.

Ahora, usted podría pensar, Él no puede *realmente* creer eso. Pero considera tu incredulidad en el contexto. ¿Cómo puede ser que un grupo de tres libras de cerebro, cuando se conecta apropiadamente a un suministro de sangre y una red de nervios, tenga una experiencia consciente familiar? *Esa* es la afirmación, basada en todo lo que la ciencia ha revelado hasta ahora, que estira la credulidad. Sin embargo, debido a su propio mundo interior, es una afirmación que usted acepta fácilmente. Si le doy algo más, que carece de cuerpo y cerebro, y le sugiero que también es consciente, el esfuerzo para aceptar esta nueva afirmación puede parecer significativo, pero en realidad, es comparativamente

modesto. Al aceptar la casi ridícula sugerencia de que un nudo gris de neuronas tiene conciencia, ya has dado el gran paso. Eso no es un argumento para la propuesta de Tononi, pero deja claro que la familiaridad puede sesgar nuestro sentido de lo absurdo.

Si este enfoque resulta ser correcto, aclarará las cualidades que debe tener un sistema para producir una experiencia consciente. Eso sería un progreso sustancial. Aún así, en su forma actual, la teoría de la información integrada nos dejaría preguntándonos por qué la conciencia *se siente* como lo hace. ¿Cómo es que una información altamente diferenciada y altamente integrada produce una conciencia interna? Según Tononi, simplemente lo hace. O, más precisamente, sugiere que esta pregunta puede ser la equivocada. En su opinión, nuestro cometido no es explicar cómo la experiencia consciente emerge de las partículas que zumban, sino más bien determinar las condiciones necesarias para que un sistema tenga tales experiencias. Y eso es lo que la teoría de la información integrada busca hacer. Aunque aprecio esta perspectiva, mi intuición, moldeada por los espectaculares éxitos de las explicaciones reduccionistas, permanecerá insatisfecha hasta que conectemos los procesos físicos que implican ingredientes de partículas familiares con las sensaciones de la mente.

Una propuesta final que ahora retomaremos persigue una estrategia diferente. Es un relato fisicalista de principio a fin, y proporciona uno de los enfoques más esclarecedores del misterio de la conciencia.

La mente modela la mente

La teoría de la conciencia del neurocientífico Michael Graziano comienza con un par de conocidas cualidades del funcionamiento del cerebro que todos podemos aceptar fácilmente. [29] Para apreciarlas, vuelva al Ferrari. Imagínese que ve el elegante exterior rojo del coche, siente la suave forma ergonómica de los tiradores de las puertas, huele el inconfundible aroma a coche nuevo, y así sucesivamente. Intuitivamente, pensamos que estas son experiencias directas de una realidad externa, pero como hemos sabido durante siglos no lo son. La ciencia moderna lo hace explícito. La luz roja que se refleja en la superficie de la Ferrari es un campo eléctrico que oscila aproximadamente cuatrocientos trillones de veces por segundo en ángulos rectos con un campo magnético similarmente oscilante, todos viajando hacia ti a trescientos millones de metros por segundo. Esa es la física de la luz roja, y ese es el estímulo que encuentran tus ojos. [30] Observen que no hay "rojo" en la descripción de la física. El rojo ocurre cuando el campo electromagnético entra en tus ojos, hace cosquillas a las moléculas sensibles a la luz en tu retina, y genera un impulso que es llevado a la corteza visual de tu cerebro, que se especializa en el procesamiento de información visual e interpreta la señal. El rojo es una construcción humana que ocurre en lo profundo de tu cabeza. ¿Y ese olor a coche nuevo? Una historia similar. Los asientos, la alfombra y el plástico envuelven las moléculas de gas que impregnan el interior del coche. No hay olor a auto nuevo hasta que esas moléculas flotan en sus fosas nasales, rozan las neuronas receptoras en su epitelio olfativo y generan un impulso que se dispara a lo largo de su nervio olfativo hacia su bulbo olfativo, que transmite la señal procesada a varias estructuras neurológicas para su interpretación. Al igual que con el rojo, el único lugar en el que ocurre el olor a coche nuevo es dentro de tu cerebro.

Y así, cuando el Ferrari llama tu atención, se pone en marcha una colección de ruedas de procesamiento de datos cognitivos. Rojas, fragantes, brillantes, metálicas, de vidrio, ruedas, motor, potencia, movimiento, velocidad, etc., una gama de cualidades físicas y capacidades funcionales son conjuradas y unidas por tu cerebro en la versión del coche que tienes en tu mente. Hasta ahora, esto suena similar a la teoría de la información integrada, pero la propuesta de Graziano lleva estas realizaciones en una dirección diferente. Su tesis central es que por muy cuidadoso que sea el detalle, sus representaciones mentales siempre se simplifican enormemente. Incluso describir el coche como "rojo" es una forma de abreviar las muchas frecuencias de luz similares pero distintas - los muchos tonos de rojo - que se reflejan en diferentes partes de la superficie del coche: las ondas electromagnéticas, por ejemplo, que oscilan a 435, 172, 874, 363, 122 ciclos por segundo desde un punto en la puerta del lado del conductor, 447, 892, 629, 261, 106 ciclos por segundo desde un punto en el capó, y así sucesivamente. [31] Tu mente se tambalearía si se tratara de tal sobreabundancia de detalles. En cambio, "rojo" es la bienvenida de la mente, aunque esquemática, simplificación. Así también para la vasta colección de simplificaciones similares que la mente hace constantemente. Para casi todo lo que se encuentra en el entorno, una representación esquemática no sólo es adecuada sino que también libera recursos mentales para otros propósitos de apoyo a la vida. Hace mucho tiempo, los cerebros que pueden haberse distraído por los detalles ondulantes del mundo físico son cerebros que se habrían comido rápidamente. Los cerebros que sobrevivieron son cerebros que evitaron ser consumidos por detalles que carecían de valor de supervivencia. Reemplaza el Ferrari rojo por una avalancha ruidosa o una tierra temblorosa, y podrás ver la ventaja de supervivencia de tener una representación mental rápida y sucia que facilite una respuesta rápida.

Cuando su atención no se dirige a los coches o a las avalanchas o a los terremotos, sino que se centra en los animales o en los humanos, también crea representaciones mentales esquemáticas. Pero más allá de las representaciones de sus formas físicas, también creas representaciones mentales esquemáticas de sus mentes. Intentas evaluar lo que pasa dentro de sus cabezas, si un animal o humano es amigo o enemigo, si ofrece seguridad o peligro, si busca una oportunidad mutua o una ganancia egoísta. Claramente, hay un valor de supervivencia significativo en la rápida evaluación de la naturaleza de nuestros encuentros con otras vidas. Los investigadores llaman a esta capacidad, refinada a lo largo de generaciones por la selección natural, nuestra teoría *de la mente* [32] (teorizamos, intuitivamente, que los seres vivos están dotados de mentes que funcionan más o menos como la nuestra), o *la postura intencional* [33] (atribuimos el conocimiento, las creencias, los deseos y, por tanto, las intenciones a los animales y humanos con los que nos encontramos).

Graziano hace hincapié en que usted aplica rutinariamente esta misma capacidad a sí mismo: crea continuamente una representación mental esquemática de su propio estado de ánimo. Si estás mirando el Ferrari rojo, no sólo creas una representación esquemática del coche, sino también una representación esquemática de tu atención centrada en Ferrari. Todas las características que se unen para representar el Ferrari se incrementan con una cualidad adicional que resume su propio enfoque mental: el Ferrari es rojo, liso y brillante,

y su atención se centra en el Ferrari siendo rojo, liso y brillante. Así es como llevas la cuenta de tu compromiso con el mundo.

Al igual que con la representación del Ferrari, y como con su representación de la atención de los demás, la representación de su propia atención deja fuera vastas franjas de detalles. Ignora los disparos neuronales subyacentes, el procesamiento de la información y los complejos intercambios de señales que generan tu atención y en su lugar esboza la atención en sí misma, lo que en el lenguaje común normalmente llamamos nuestra "conciencia". Y esto, de acuerdo con Graziano, es el corazón de por qué la experiencia consciente parece flotar sin amarrar en la mente. Cuando la inclinación del cerebro por las representaciones esquemáticas simplificadas se aplica a sí mismo, a su propia atención, la descripción resultante ignora los mismos procesos físicos responsables de esa atención. Por eso los pensamientos y las sensaciones parecen etéreos, como si vinieran de la nada, como si revolotearan en nuestras cabezas. Si su representación esquemática de su cuerpo dejara fuera sus brazos, el movimiento de sus manos también parecería etéreo. Y es por eso que la experiencia consciente parece totalmente distinta de los procesos físicos llevados a cabo por nuestros componentes particulados y celulares. El problema más difícil parece ser que la conciencia parece trascender lo físico, porque nuestros modelos mentales esquemáticos suprimen el conocimiento de la mecánica del cerebro que conecta nuestros pensamientos y sensaciones con sus fundamentos físicos.

El atractivo de una teoría fisicalista como la de Graziano (y otras que han sido propuestas y desarrolladas [34]) es que la conciencia, como la vida, se reduciría a arreglos conducentes de componentes sin vida, sin pensamientos y sin emociones. Ciertamente, hay un vasto paisaje neurológico que se extiende entre nosotros y esa tierra prometida de entendimiento reduccionista. Pero a diferencia de la terra incognita imaginada por Chalmers, en la que los investigadores tendrán que caminar por tierras extrañas y follaje desconocido, la expedición fisicalista probablemente ofrecerá sorpresas menos exóticas. El desafío no será estudiar un mundo alienígena, sino trazar un mapa de nuestro propio cerebro con un detalle sin precedentes. Es la familiaridad del terreno lo que hará que un viaje exitoso sea tan maravilloso. Sin necesidad de una chispa supracientífica, sin invocar nuevas cualidades de la materia, la conciencia simplemente emergerá. La materia ordinaria, gobernada por leyes ordinarias, llevando a cabo procesos ordinarios, tendría la extraordinaria capacidad de pensar y sentir.

He encontrado muchas personas que se resisten a esta perspectiva. Gente que siente que cualquier intento de subsumir la conciencia dentro de la descripción física del mundo menosprecia nuestra más preciada cualidad. Gente que sugiere que el programa fisicalista es el enfoque de los científicos cegados por el materialismo e inconscientes de las verdaderas maravillas de la experiencia consciente. Por supuesto, nadie sabe cómo se desarrollará todo esto. Quizás dentro de cien o mil años el programa fisicalista parezca ingenuo. Lo dudo. Pero al reconocer esta posibilidad, también es importante contrarrestar la presunción de que al delinear una base física para la conciencia la devaluamos. Que la mente pueda hacer todo lo que hace es extraordinario. Que la mente pueda lograr todo lo que hace con nada más que los tipos de ingredientes y los tipos de fuerzas que mantienen

unida mi taza de café la hace aún más extraordinaria. La conciencia sería desmitificada sin ser disminuida.

Conciencia y Física Cuántica

A lo largo de las décadas, una sugerencia frecuente ha sido que la física cuántica es esencial para comprender la conciencia. En un sentido esto es seguramente cierto. Las estructuras materiales, incluido el cerebro, están hechas de partículas cuyo comportamiento se rige por las leyes de la mecánica cuántica. Así, la mecánica cuántica sustenta la base física de todo, incluyendo la mente. Pero cuando la conciencia se encuentra con el cuántico, no es raro que los comentaristas sugieran conexiones más profundas. Muchas de ellas están motivadas por una brecha en nuestra comprensión de la mecánica cuántica que se ha resistido a un siglo de pensamiento por algunas de las mentes científicas y filosóficas más consumadas del mundo. Permítanme explicarles.

La mecánica cuántica es el marco teórico más preciso para describir los procesos físicos que se ha desarrollado. Nunca ha habido una predicción de la mecánica cuántica que haya sido contradicha por experimentos replicables, y los resultados de algunos de los cálculos más detallados de la mecánica cuántica coinciden con los datos experimentales en más de una parte entre mil millones. Si no te gustan las cifras cuantitativas, la mayoría de las veces está bien dejar que te inunden. Pero no ahora. Tomemos el número que acabo de citar: *los cálculos de la mecánica cuántica, basados en la ecuación de Schrödinger, concuerdan con las medidas experimentales en más de nueve dígitos después del punto decimal.* [35] Las trompetas deberían sonar y la especie debería hacer una reverencia porque eso representa un triunfo del entendimiento humano.

Sin embargo, hay un rompecabezas en el núcleo de la teoría cuántica.

La principal novedad de la mecánica cuántica es que sus predicciones son probabilísticas. La teoría podría afirmar que hay un 20 por ciento de probabilidades de que un electrón se encuentre aquí, un 35 por ciento de probabilidades de que se encuentre allá, y un 45 por ciento de probabilidades de que se encuentre allá. Si luego se mide la posición del electrón en una gran cantidad de versiones preparadas de forma idéntica del mismo experimento, se encontrará con una precisión impresionante que en el 20 por ciento de las mediciones el electrón *está* aquí, en el 35 por ciento de ellas *está allá*, y en el 45 por ciento de las veces *está* muy lejos. Es por eso que tenemos confianza en la teoría cuántica.

Ahora, la dependencia de la teoría cuántica en las probabilidades puede no sonar particularmente exótica. Después de todo, cuando tiras una moneda, también usamos probabilidades para describir el posible resultado: hay un 50 por ciento de probabilidades de que la moneda caiga cara y un 50 por ciento de probabilidades de que caiga cruz. Pero aquí está la diferencia, familiar para muchos pero aún así profundamente impactante: en la descripción clásica ordinaria, después de lanzar la moneda pero antes de mirar, la moneda es cara o cruz, simplemente no se sabe cuál. Por el contrario, en la descripción cuántica, antes de examinar el paradero de una partícula como un electrón que tiene un 50 por ciento de posibilidades de estar aquí y un 50 por ciento de posibilidades de estar allí, la partícula no está *ni aquí ni* allí. En cambio, la mecánica cuántica dice que la partícula está flotando

en una mezcla borrosa de estar *aquí* y allá. Y si las probabilidades dan al electrón una oportunidad distinta de estar en una variedad de lugares diferentes, entonces según la mecánica cuántica estaría flotando en una mezcla difusa de estar situada simultáneamente en todos ellos. Esto es tan fantásticamente extraño, y tan contrario a la experiencia, que podrías estar tentado de descartar la teoría de plano. Y si no fuera por la incomparable capacidad de la mecánica cuántica para explicar los datos experimentales, esa reacción estaría tan extendida como justificada. Sin embargo, los datos nos obligan a tratar a la mecánica cuántica con el mayor respeto, por lo que los científicos hemos trabajado incansablemente para dar sentido a esta característica contraria a la intuición.[36]

El problema es que cuanto más hemos trabajado, más raras se han vuelto las cosas. No hay nada en las ecuaciones cuánticas que muestre cómo la realidad pasa de la mezcla borrosa de muchas posibilidades al único resultado definitivo que se observa al realizar una medición. De hecho, si asumimos -como parece totalmente sensato- que las mismas ecuaciones cuánticas exitosas se aplican no sólo a los electrones (y otras partículas) que usted puede estar estudiando, sino también a los electrones (y otras partículas) que componen su equipo, y a los que lo componen a usted, y a los que componen su cerebro, entonces según las matemáticas la transición no debería ocurrir en absoluto. Si un electrón se encuentra suspendido tanto aquí como allá, entonces tu equipo debería encontrar que está tanto aquí como allá, y al leer la pantalla del equipo, tu cerebro debería pensar que el electrón está tanto aquí como allá. Es decir, después de realizar una medición, la confusión cuántica de las partículas que está estudiando debería infectar su equipo, su cerebro, y presumiblemente su conciencia consciente, causando que sus pensamientos floten en una mezcla borrosa de múltiples resultados. Y aún así, después de todas y cada una de las mediciones, no reportas nada de eso. Reporta que fue testigo de un único y definitivo resultado. El desafío, conocido como el *problema de la medición cuántica,* es resolver la desconcertante disparidad entre la borrosa realidad cuántica descrita por las ecuaciones y la aguda realidad familiar que experimentas constantemente.[37]

Ya en los años 30, los físicos Fritz London y Edmond Bauer[38], y unas décadas más tarde el premio Nobel Eugene Wigner[39], futuros posibles, excepto uno, son eliminados, ya sea de la realidad misma o al menos de nuestra conciencia cognitiva.

Puedes ver el atractivo. La mecánica cuántica es misteriosa. La conciencia es misteriosa. Qué divertido imaginar que sus misterios están relacionados, o son el mismo misterio, o que cada misterio resuelve el del otro. Pero en mis décadas de inmersión en la física cuántica, no he encontrado un argumento matemático o datos experimentales que hayan cambiado mi evaluación de larga data del supuesto vínculo: extraordinariamente improbable. Nuestros experimentos y observaciones apoyan la opinión de que cuando un sistema cuántico es pinchado - ya sea que el pinchador sea un ser consciente o una sonda sin mente - el sistema sale de la neblina cuántica probabilística y asume una realidad definida. Las interacciones, no la conciencia, propician el surgimiento de una realidad definida. Por supuesto, para verificar esto, o cualquier otra cosa, tengo que traer mi conciencia para que me ayude; no puedo ser consciente de un resultado sin que mi mente consciente participe en el proceso. Así que no hay un argumento infalible de que la

conciencia no juega un papel cuántico especial. Sin embargo, incluso en los enfoques más refinados, que han ido mucho más allá de una identificación superficial de dos misterios aparentemente distintos, las conexiones propuestas de la conciencia cuántica son tenues.

A medida que nuestra comprensión de la mecánica cuántica se profundice, también lo hará nuestra contabilidad de los procesos microfísicos que subyacen a las funciones de todo, incluyendo el cuerpo y el cerebro. Desde una postura fisicalista, la conciencia está entre tales funciones y así un día se incluirá dentro de una contabilidad cuántica. Sin embargo, salvo una sorpresa sorprendente, los libros de texto de mecánica cuántica del futuro próximo o lejano no incluirán directivas especiales sobre cómo usar las ecuaciones en presencia de la conciencia. Aunque es magnífica, la conciencia será entendida como otra cualidad física que surge en un universo cuántico.

Libre albedrío

Pocos nos enorgullecemos de cómo nuestro páncreas produce quimotripsina o la red del nervio trigémino facilita un estornudo. No sentimos un interés personal en nuestros procesos autonómicos. Si me preguntan quién soy, recurro a los pensamientos, sensaciones y recuerdos a los que puedo acceder con el ojo de mi mente o interrogar con mi voz interior. El páncreas de todos sintetiza quimotripsina y todos estornudan pero, me gusta imaginar, que hay algo profundo, completo e intrínseco en lo que pienso, en lo que siento, en lo que hago. Enredado en esta intuición hay una creencia tan común que muchos de nosotros nunca lo pensamos dos veces, y mucho menos la primera: Tenemos una voluntad libre. Somos autónomos. Tomamos nuestras propias decisiones. Somos la fuente última de nuestras acciones. ¿Pero lo somos?

Esta pregunta ha inspirado más páginas en la literatura filosófica que cualquier otro enigma. Hace dos mil años, la visión del mundo de Demócrito que consistía en átomos y el vacío era un presciente asentimiento a la unidad de la naturaleza, desechando el capricho caprichoso de los dioses en favor de leyes inmutables. Pero si las idas y venidas están totalmente controladas por el poder divino o por la ley física, nos quedamos preguntando dónde, si es que en algún lugar, hay espacio para las acciones de libre voluntad. [40] Un siglo después, Epicuro, que había rechazado la intervención divina, lamentó el hecho de que el determinismo científico estaba sofocando el libre albedrío. Si concedemos que los dioses tienen autoridad, al menos existe la posibilidad de que nuestra firme reverencia sea recompensada con una asignación de libertad. Pero la ley natural, inmune a toda adulación, es incapaz de aflojar las riendas. Para resolver el dilema, Epicuro imaginó que de vez en cuando los átomos ejecutan espontáneamente un desvío al azar, desafiando su legítimo destino y permitiendo un futuro no determinado por el pasado. Aunque seguramente era un movimiento creativo, lejos de todos encontraban la inserción arbitraria del azar en las leyes de la naturaleza una fuente convincente para la libertad humana. Y así, a lo largo de los siglos siguientes, el problema del libre albedrío continuó surcando las cejas de un panteón de pensadores venerados -San Agustín, Tomás de Aquino, Tomás Hobbes, Gottfried Leibniz, David Hume, Immanuel Kant, John Locke- y a través de un linaje demasiado largo para enumerar, incluyendo a muchos que actualmente piensan en esas cosas en los departamentos de filosofía de todo el mundo.

Aquí hay una versión moderna del argumento que hace retroceder al libre albedrío. Sus experiencias y las mías parecen confirmar que influimos en el desarrollo de la realidad a través de acciones que reflejan nuestros pensamientos, deseos y decisiones de libre albedrío. Sin embargo, manteniendo nuestra postura fisicalista, usted y yo no somos más que constelaciones de partículas [41] cuyo comportamiento está totalmente gobernado por la ley física. Nuestras elecciones son el resultado de nuestras partículas que corren de una manera u otra a través de nuestros cerebros. Nuestras acciones son el resultado de nuestras partículas moviéndose de una manera u otra a través de nuestros cuerpos. Y todo el movimiento de las partículas, ya sea en un cerebro, un cuerpo o una pelota de béisbol, está controlado por la física y por lo tanto está totalmente dictado por decreto matemático. Las ecuaciones determinan el estado de nuestras partículas hoy en base a su estado ayer, sin oportunidad para ninguno de nosotros de terminar las matemáticas y dar forma libremente, o moldear, o cambiar el despliegue legal. De hecho, siguiendo esta cadena cada vez más atrás, el big bang es la fuente última de todas las partículas, y su comportamiento a lo largo de la historia cósmica ha sido dictado por las no negociables e insensatas leyes de la física, que determinan la estructura y la función de todo lo que existe. Nuestro sentido de la individualidad, el valor y la estima descansan en nuestra autonomía. Pero frente a la intransigencia de la ley física, la autonomía se retira. No somos más que juguetes golpeados de un lado a otro por las desapasionadas reglas del cosmos.

La pregunta central, entonces, es si hay alguna manera de evitar esta aparente disolución del libre albedrío en el movimiento de las partículas serviles. Muchos pensadores lo han intentado. Algunos han renunciado al reduccionismo. Aunque los voluminosos datos confirman que tenemos una profunda comprensión de las leyes que rigen las partículas individuales (electrones, quarks, neutrinos, etc.), tal vez cuando cien mil millones de billones de partículas se organizan en un cuerpo y un cerebro humanos, ya no se rigen, o al menos no se rigen totalmente, por las leyes fundamentales del micromundo. Y tal vez, esta línea de pensamiento imagina, esto permite fenómenos a escalas macroscópicas - notablemente, el libre albedrío - que las leyes microscópicas prohibirían.

Es cierto que nadie ha realizado nunca el análisis matemático necesario para hacer predicciones sobre la progresión lícita de las partículas que constituyen una persona. La complejidad de las matemáticas estaría fantásticamente más allá de nuestras más refinadas capacidades de cálculo. Incluso la predicción del movimiento de un objeto mucho más simple como una bola de billar puede eludirnos porque las pequeñas imprecisiones en la determinación de la velocidad y dirección inicial de la bola pueden ser amplificadas exponencialmente cuando la bola rebota en las orillas de la mesa. Así que mi enfoque aquí no es predecir su próximo movimiento. Mi atención se centra en la existencia de leyes que gobiernan tu próximo movimiento. Y aunque los cálculos exceden nuestras habilidades actuales, nunca ha habido la más mínima indicación matemática, experimental u observacional de que estas leyes ejerzan algo más que un control total. Fenómenos inesperados e impresionantes pueden seguramente emerger del movimiento coordinado de una gran cantidad de ingredientes microscópicos - desde tifones hasta tigres - pero toda la evidencia sugiere que si fuéramos capaces de trabajar en las matemáticas para grupos tan

grandes de partículas que interactúan, seríamos capaces de predecir sus comportamientos colectivos. Y así, mientras que es lógicamente concebible que un día aprendamos que las colecciones de partículas que constituyen los cuerpos y los cerebros se liberan de las reglas que rigen las colecciones inanimadas, esta posibilidad contraviene todo lo que la ciencia ha revelado hasta ahora sobre el funcionamiento del mundo.

Otros investigadores han apostado por la mecánica cuántica. Después de todo, la física clásica es determinista: proporciona las matemáticas de la física clásica - las ecuaciones de Newton - con las ubicaciones precisas y las velocidades de todas las partículas en cualquier momento y las ecuaciones le dirán sus ubicaciones y velocidades en cualquier momento futuro. Con tal rigidez, con el futuro totalmente determinado por el pasado, ¿cómo puede haber espacio para el libre albedrío? El estado de tus partículas en este momento, leyendo estas palabras y contemplando estas ideas, fue determinado por su configuración mucho antes de que nacieras y por lo tanto, seguramente, no podría haber sido seleccionado por tu voluntad. Pero en la física cuántica, como hemos visto, las ecuaciones sólo predicen la *probabilidad* de cómo serán las cosas en cualquier momento futuro. Al insertar un elemento de probabilidad-oportunidad-mecánica cuántica parece proporcionar una versión moderna y experimental del desvío epicúreo, aflojando las riendas deterministas. Sin embargo, el lenguaje suelto puede ser engañoso. Las matemáticas de la mecánica cuántica, la ecuación de Schrödinger, son tan deterministas como las matemáticas de la física clásica newtoniana. La diferencia es que mientras que Newton toma como entrada el estado del mundo ahora y produce un estado único para el mundo de mañana, la mecánica cuántica toma como entrada el estado del mundo ahora y produce una tabla única de probabilidades para el estado del mundo de mañana. Las ecuaciones cuánticas establecen muchos futuros posibles, pero cincelan determinantemente la probabilidad de cada uno en piedra matemática. Al igual que Newton, Schrödinger no deja espacio para el libre albedrío.

Sin embargo, otros investigadores se han centrado en el problema no resuelto de la medición cuántica. Es comprensible. Una brecha en el conocimiento científico es un lugar atractivo para esconder algo muy valioso, al menos hasta que la brecha se cierre. Esa brecha, como recordarán, es que todavía no hay consenso sobre cómo el mundo pasa del relato probabilístico proporcionado por la mecánica cuántica a la realidad definitiva de la experiencia común. ¿Cómo se selecciona un futuro único de la lista de posibilidades de la mecánica cuántica? Y, de particular interés aquí, ¿podría el libre albedrío estar al acecho en la respuesta? Desafortunadamente, no. Consideremos un electrón que según la mecánica cuántica tiene un 50 por ciento de posibilidades de estar *aquí* y un 50 por ciento de posibilidades de estar *allí*. *¿Puedes elegir libremente* el resultado -aquí o *allí*- *que* una observación de su posición revelará? No se puede. Los datos atestiguan que el resultado es aleatorio, y los resultados aleatorios no son elecciones libremente elegidas. Los datos también confirman que los resultados acumulados en muchos de estos experimentos tienen una regularidad estadística: en este ejemplo, la mitad de los resultados encontrarán el electrón *aquí* y la otra mitad lo encontrará *allí*. Una elección de libre albedrío no está limitada, ni siquiera en un sentido estadístico, por reglas matemáticas. Pero como la evidencia demuestra en este caso y en todos los demás también, las matemáticas *sí rigen*.

Así que aunque el paso de las probabilidades cuánticas a las certezas experienciales sigue siendo desconcertante, está claro que el libre albedrío no es parte del proceso.

Para ser libre se requiere que no seamos marionetas cuyos hilos se mueven por la ley física. El hecho de que las leyes sean deterministas (como en la física clásica) o probabilísticas (como en la física cuántica) tiene una profunda importancia para la evolución de la realidad y para el tipo de predicciones que la ciencia puede hacer. Pero para evaluar el libre albedrío, la distinción es irrelevante. Si las leyes fundamentales pueden agitarse continuamente, sin detenerse nunca por falta de intervención humana y aplicarse de todas formas incluso si las partículas habitan en los cuerpos y cerebros, entonces no hay lugar para el libre albedrío. De hecho, como se afirma en todos los experimentos y observaciones científicas que se han realizado, mucho antes de que los humanos entráramos en escena las leyes gobernaban sin interrupción; después de que llegáramos, seguían gobernando sin interrupción.

En resumen: Somos seres físicos hechos de grandes colecciones de partículas gobernadas por las leyes de la naturaleza. Todo lo que hacemos y todo lo que pensamos equivale a movimientos de esas partículas. Estrecha mi mano y las partículas que constituyen tu mano empujan hacia arriba y hacia abajo contra las que constituyen la mía. Saluda, y las partículas que constituyen tus cuerdas vocales empujan partículas de aire en tu garganta, provocando una reacción en cadena de partículas que chocan entre sí y que se ondulan en el aire, golpeando las partículas que constituyen mis tímpanos, provocando una oleada de otras partículas en mi cabeza, que es como me las arreglo para escuchar lo que estás diciendo. Las partículas de mi cerebro responden a los estímulos, produciendo el pensamiento *que es un fuerte agarre*, y enviando señales llevadas por otras partículas a las de mi brazo, que hacen que mi mano se mueva en tándem con la suya. Y como todas las observaciones, experimentos y teorías válidas confirman que el movimiento de las partículas está totalmente controlado por reglas matemáticas, no podemos interceder en esta progresión lícita de las partículas como tampoco podemos cambiar el valor de pi.

Nuestras elecciones *parecen* libres porque no presenciamos las leyes de la naturaleza actuando en su forma más fundamental; nuestros sentidos no revelan el funcionamiento de las leyes de la naturaleza en el mundo de las partículas. Nuestros sentidos y nuestro razonamiento se centran en las básculas y acciones humanas cotidianas: pensamos en el futuro, comparamos cursos de acción y sopesamos las posibilidades. Como resultado, cuando nuestras partículas actúan, nos parece que sus comportamientos colectivos emergen de nuestras elecciones autónomas. Sin embargo, si tuviéramos la visión sobrehumana invocada anteriormente y fuéramos capaces de analizar la realidad cotidiana a nivel de sus constituyentes fundamentales, reconoceríamos que nuestros pensamientos y comportamientos equivalen a procesos complejos de partículas cambiantes que producen una poderosa sensación de libre albedrío pero que se rigen plenamente por la ley física.

Y sin embargo, concluir nuestra discusión aquí sería pasar por alto una variación del tema de la libertad que no sólo encaja con nuestra comprensión de la ley física, sino que capta una cualidad tan esencial que se puede tomar como una característica definitoria de lo que significa ser humano.

Rocas, Humanos y Libertad

Imagina que tú y una roca, cada uno ocupándose de sus propios asuntos, están sentados tranquilamente uno al lado del otro en un banco del parque. Mientras camino, de repente ves que una rama de árbol se ha roto y se precipita hacia mí. Salta del banco y me ataca con gran fuerza, empujándonos a ambos fuera de peligro. ¿Cuál es la explicación de tu acto heroico, de salvar vidas? Todas las partículas que te componen y todas las que componen la roca están sujetas a las mismas leyes, y así ni tú ni la roca tienen libre albedrío. Sin embargo, eres tú el que saltó del banco mientras la roca se quedó ahí. ¿Cómo explicamos esto?

Me salvaste, pero la roca no lo hizo porque tus partículas están tan espectacularmente ordenadas, tan impresionantemente configuradas, que pueden realizar movimientos exquisitamente coreografiados que no son posibles para las partículas que constituyen la roca. [42] Al pasar por aquí, puedes saludar con la mano, o decirme que has resuelto las ecuaciones de la teoría de cuerdas, o hacer saltos, o salvarme de una rama que se cae, o un millón de otras posibilidades. Los fotones que rebotan en mi cara y entran en tus ojos, las ondas de sonido que vibran de una rama que se rompe y entran en tus oídos, las influencias táctiles de una fuerte brisa que sopla contra tu piel, así como una amplia gama de otros estímulos externos e internos, desencadenan cascadas de partículas en todo tu cuerpo que llevan señales que generan una gran cantidad de sensaciones, pensamientos y comportamientos, que son en sí mismas otras cascadas de partículas. Afortunadamente para mí, la cascada de partículas específica en respuesta a los estímulos de la rama que se rompe empuja tus partículas a la acción inmediata. En comparación, las respuestas de la roca a los estímulos son más apagadas. Los fotones, las ondas de sonido y las presiones táctiles que inciden generan la más simple de las reacciones. Las partículas de la roca pueden temblar ligeramente, su temperatura puede aumentar ligeramente, o para un viento especialmente fuerte las posiciones de todo el lote pueden cambiar ligeramente. Eso es todo. Dentro de la roca no hay mucho que hacer. Lo que te hace especial es que tu sofisticada organización interna permite un rico espectro de respuestas de comportamiento.

La cuestión, pues, es que al evaluar el libre albedrío hay mucho que ganar si se pasa de un enfoque estrecho de la causa última a un examen más amplio de la respuesta humana. Nuestra libertad no es de las leyes físicas que están más allá de nuestra capacidad de afectar. Nuestra libertad es para exhibir comportamientos - saltarse, pensar, imaginar, observar, deliberar, explicar, etc. - que no están disponibles para la mayoría de las otras colecciones de partículas. La libertad humana no se trata de una elección voluntaria. Todo lo que la ciencia ha revelado hasta ahora sólo ha reforzado el caso de que tal intercesión volitiva en el desarrollo de la realidad no existe. En su lugar, la libertad humana se trata de ser liberado de la esclavitud de un empobrecido rango de respuesta que ha limitado por mucho tiempo el comportamiento del mundo inanimado.

Esta noción de libertad no requiere libre albedrío. Su acto salvador, aunque debidamente apreciado, surgió de la acción de la ley física y por lo tanto no fue de libre voluntad. Pero el hecho de que sus partículas fueran capaces de saltar del banco, y más tarde, de reflexionar sobre su acción y ser movidas por su reflejo, es totalmente asombroso.

Las partículas agrupadas en una roca no pueden hacer nada remotamente parecido a esto. Y son estas capacidades que se manifiestan como el maravilloso barrido de pensamiento, sentimiento y comportamiento que captura la esencia del ser humano, la esencia de la libertad humana.

Mi uso del término "libre" para describir comportamientos que según las leyes de la física no son de libre voluntad puede parecer un cebo lingüístico. Pero el punto, como la escuela filosófica compatibilista ha sugerido durante mucho tiempo, es que cuando se trata de la libertad y la física, no todo está perdido; hay un gran beneficio en considerar tipos alternativos de libertad que se ajusten a la ley física. Hay varias propuestas sobre cómo lograrlo, pero es como si tales teorías dieran sombríamente la mala noticia, "Cuando se trata del tipo tradicional de libre albedrío, no eres diferente de una roca", pero entonces, justo cuando te das la vuelta para enfurruñarte, exclaman, "¡Pero anímate! Hay *otra* variedad de libertad, gratificante por derecho propio, que tienes en abundancia." [43] En el enfoque que defiendo, tal libertad se encuentra en la liberación de una gama restringida de comportamientos.

Personalmente, me siento muy cómodo en esta variedad de libertad. Mientras estoy sentado aquí, escribiendo mis pensamientos, no me perturba la comprensión de que a nivel de las partículas fundamentales todo lo que estoy pensando y todo lo que estoy haciendo constituye el despliegue de las leyes físicas que están más allá de mi control. Lo que me importa es que, a diferencia de mi escritorio y a diferencia de mi silla y a diferencia de mi taza, mi colección de partículas es capaz de ejecutar un conjunto de comportamientos enormemente diversos. De hecho, mis partículas acaban de componer esta misma frase y me complace que lo hayan hecho. Claro, esa reacción, también, no es más que mi ejército de partículas llevando a cabo sus órdenes de marcha de mecánica cuántica, pero eso no disminuye la realidad de la sensación. Soy libre no porque pueda reemplazar la ley física, sino porque mi prodigiosa organización interna ha emancipado mis respuestas conductuales.

Relevancia, aprendizaje e individualidad

Abandonar el concepto tradicional de libre albedrío puede parecer que aún requiere renunciar a mucho de lo que valoramos. Si el desarrollo de la realidad, incluyendo el de los seres sensibles, está fijado por la ley física, ¿importa nuestro comportamiento? ¿Podemos simplemente sentarnos, no hacer nada, y dejar que la física siga su curso? ¿Hay algún lugar para la individualidad? ¿Cómo pueden jugar algún papel las capacidades que tanto valoramos, como el aprendizaje y la creatividad?

Tomemos primero esta última pregunta. Y al hacerlo, es útil pensar en una Roomba. ¿Posee una Roomba la tradicional cualidad del libre albedrío? No te esfuerces. No es una pregunta capciosa. La mayoría de nosotros estaríamos de acuerdo en que no. Sin embargo, a medida que la Roomba se desliza por el suelo de su sala de estar, encontrando paredes, columnas y muebles, su configuración interna de partículas se reordena, sus mapas de navegación e instrucciones internas se actualizan, y estos cambios modifican el comportamiento posterior de la Roomba. El Roomba *aprende*. De hecho, mientras el

Roomba se enfrenta al reto de navegar por los objetos que ha encontrado, las soluciones que emplea -evitar esas escaleras, dar vueltas alrededor de esa pata de la mesa, y así sucesivamente- muestran una creatividad rudimentaria. [44] El aprendizaje y la creatividad no requieren de libre albedrío.

Su organización interna, su "software", es más refinado que el de Roomba, facilitando su más sofisticada capacidad de aprendizaje y creatividad. En un momento dado, tus partículas están en un arreglo específico. Tus experiencias, ya sean encuentros externos o deliberaciones internas, reconfiguran ese arreglo. Y tales reconfiguraciones impactan en cómo se comportarán tus partículas posteriormente. Es decir, tales reconfiguraciones actualizan tu software, ajustando las instrucciones que guían tus pensamientos y acciones subsiguientes. Una chispa imaginativa, un error garrafal, una línea inteligente, un abrazo empático, un comentario desdeñoso, un acto heroico, todo ello resulta de su constelación personal de partículas que progresa de un arreglo a otro. Al observar cómo todos y todo responden a tus acciones, tu constelación de partículas cambia de nuevo, reconfigurando su patrón para ajustar aún más tu comportamiento. A nivel de tus ingredientes de partículas, esto *es* aprendizaje. Y cuando los comportamientos resultantes son novedosos, la reconfiguración ha generado creatividad.

Esta discusión destaca uno de nuestros temas centrales: la necesidad de historias anidadas que expliquen las capas distintas pero interconectadas de la realidad. Si te conformas con una historia que describe el desarrollo de la realidad únicamente a nivel de las partículas, no estarías motivado para introducir conceptos como el aprendizaje y la creatividad (o, para el caso, la entropía y la evolución). Todo lo que necesitarías saber es cómo las colecciones de partículas reorganizan continuamente su configuración, y que la información es entregada por las leyes fundamentales (y una especificación del estado de las partículas en algún momento del pasado). Pero la mayoría de nosotros no estamos contentos con ese tipo de historia. La mayoría de nosotros encontramos esclarecedor contar historias adicionales, compatibles con el relato reduccionista, pero centradas en escalas más grandes y familiares. Es en estas historias, cuyos protagonistas son agregados de partículas como tú y yo y el Roomba, que los conceptos que incluyen el aprendizaje y la creatividad (y la entropía y la evolución) proporcionan un lenguaje indispensable. Mientras que la historia reduccionista que describe a los Roomba catalogaría el movimiento de miles de millones de partículas, la historia de mayor nivel podría explicar que los sensores de los Roomba reconocieron que se encontraba al borde de una escalera, almacenaron esa peligrosa ubicación en la memoria e invirtieron el curso para evitar una caída potencialmente catastrófica. Las dos historias son totalmente compatibles aunque una utiliza el lenguaje de las partículas y las leyes mientras que la otra utiliza el lenguaje de los estímulos y las respuestas. Y debido a que las respuestas de los Roomba incluyen la capacidad de modificar el comportamiento futuro actualizando sus instrucciones internas, los conceptos de aprendizaje y creatividad son esenciales para la historia de nivel superior.

Tales historias anidadas son aún más relevantes cuando se trata de ti y de mí. El relato reduccionista, que nos describe a ambos como colecciones de partículas, proporciona importantes pero limitadas percepciones. Reconocemos, por ejemplo, que estamos hechos

de la misma materia y regidos por las mismas leyes que todas las estructuras materiales. Pero la historia de más alto nivel, la historia humana, es la que nos sirve para vivir nuestras vidas. Pensamos y deliberamos, luchamos y nos esforzamos, tenemos éxito y fracasamos. Las historias contadas en este lenguaje familiar deben, de nuevo, ser totalmente compatibles con los relatos reduccionistas contados en términos de partículas. Pero al servicio de la vida cotidiana, estas historias de alto nivel son incomparablemente más esclarecedoras. Cuando ceno con mi esposa, no me interesa tanto escuchar un relato del movimiento realizado por sus cien billones de billones de partículas. Sin embargo, cuando me cuenta las ideas que está desarrollando, los lugares a los que va y la gente que conoce, me siento muy a gusto.

Dentro de estos relatos de alto nivel, hablamos como si nuestras acciones tuvieran relevancia, nuestras elecciones tienen impacto, nuestras decisiones tienen significado. En un mundo que progresa a través de una ley física resuelta, ¿lo hacen? Sí. Por supuesto que sí. Cuando mi hijo de diez años encendió una cerilla en un horno de gas, esa acción tuvo consecuencias. Esa acción provocó una explosión. El relato de más alto nivel que presenta una serie de eventos conectados -sentirse hambriento, poner una pizza en el horno, encender el gas, esperar, golpear el fósforo, ser engullido por las llamas- es preciso y perspicaz. La física no niega esta historia. La física no agota esta historia de relevancia. La física aumenta esta historia. La física nos dice que hay otro relato, subyacente a la historia a nivel humano, contado en el lenguaje de las leyes y las partículas.

Lo que es notable, y para algunos inquietante, es que estos relatos subyacentes revelan que una creencia común que impregna nuestras historias de alto nivel es defectuosa. Sentimos que somos los autores últimos de nuestras elecciones, decisiones y acciones, pero la historia reduccionista deja claro que no lo somos. Ni nuestros pensamientos ni nuestros comportamientos pueden liberarse de las garras de la ley física. Sin embargo, las secuencias causalmente conectadas en el corazón de nuestras historias de alto nivel - mi sensación de hambre que me hace insertar una pizza en el horno, me lleva a comprobar su temperatura, lo que resulta en mi golpe de fósforo - son manifiestas y reales. Los pensamientos, respuestas y acciones importan. Tienen consecuencias. Son los eslabones de la cadena del desarrollo físico. Lo que es inesperado, basado en nuestras experiencias e intuiciones, es que tales pensamientos, respuestas y acciones surgen de causas antecedentes canalizadas a través de las leyes de la física.

La responsabilidad también tiene un papel. Aunque mis partículas, y por lo tanto mis comportamientos, están bajo la plena jurisdicción de la ley física, "yo" soy de una manera muy literal aunque desconocida responsable de mis acciones. En un momento dado, *soy* mi colección de partículas; "yo" no es más que una abreviatura que significa mi configuración específica de partículas (que, aunque dinámica, mantiene patrones suficientemente estables para proporcionar un sentido consistente de identidad personal [45]). Por consiguiente, el comportamiento de mis partículas es *mi* comportamiento. Que la física subyace a este comportamiento a través de su control de mis partículas es seguramente interesante. Que tal comportamiento no es de libre voluntad es digno de reconocimiento. Pero estas observaciones no disminuyen la descripción de nivel superior que reconoce que mi configuración específica de partículas -la forma en que mis partículas están organizadas en

una intrincada red química y biológica que incluye genes, proteínas, células, neuronas, conexiones sinápticas, etc.- responde de una manera que es única para mí. Tú y yo hablamos, actuamos, respondemos y pensamos de manera diferente porque nuestras partículas están dispuestas de manera diferente. A medida que mi disposición de partículas aprende y piensa y sintetiza e interactúa y responde, imprime mi individualidad y marca mi responsabilidad en cada acción que tomo.[46]

La capacidad humana de responder con gran variedad es el testamento de los principios básicos que han guiado nuestra exploración hasta ahora: el doble paso entrópico y la evolución por selección natural. El doble paso entrópico explica cómo pueden formarse cúmulos ordenados en un mundo cada vez más desordenado, y cómo algunos de estos cúmulos, las estrellas, pueden permanecer estables durante miles de millones de años, ya que producen una salida constante de calor y luz. La evolución explica cómo, en un entorno favorable como un planeta bañado por el calor constante de una estrella, las colecciones de partículas pueden unirse en patrones que faciliten comportamientos complejos, desde la replicación y la reparación, hasta la extracción de energía y el procesamiento metabólico, la locomoción y el crecimiento. Las colecciones que adquieren las capacidades adicionales de pensar y aprender, de comunicarse y cooperar, de imaginar y predecir, están mejor equipadas para sobrevivir y, por lo tanto, para producir colecciones similares con capacidades similares. Así pues, la evolución selecciona para estas capacidades y, generación tras generación, las refina. Con el tiempo, algunas colecciones llegan a la conclusión de que sus capacidades cognitivas son tan notables que trascienden las leyes físicas. Algunas de las colecciones más reflexivas se ven entonces desconcertadas por el conflicto entre la libertad de voluntad que experimentan y el control inquebrantable de la ley física que reconocen. Pero el hecho es que no hay conflicto porque no hay trascendencia de la ley física. No puede haber. En su lugar, las colecciones de partículas necesitan reevaluar sus poderes, centrándose no en las leyes que gobiernan a las partículas en sí mismas, sino en los comportamientos de alto nivel, completamente complejos y extraordinariamente ricos que cada colección de partículas, cada individuo, puede exhibir y experimentar. Y con esa reorientación, las colecciones de partículas pueden contar una historia esclarecedora de comportamientos y experiencias maravillosos, impregnados de voluntades que se sienten libres y hablan como si tuvieran control autónomo, y sin embargo están totalmente gobernadas por las leyes de la física.

Algunos se opondrán a esta conclusión. Seguro que sí. Aunque estoy convencido intelectualmente por el argumento que he presentado, eso no deshace mi profunda y fuerte impresión de que controlo libremente lo que pasa dentro de mi cabeza. Pero la fuerza de esa impresión se basa en gran parte en su familiaridad. Y como muchos de los que han experimentado con sustancias que alteran la mente pueden atestiguar, cuando la identidad de las partículas que recorren el cerebro se modifica aunque sea modestamente, lo familiar puede cambiar. El equilibrio de poder en el cerebro puede cambiar. La mente puede aparentemente tener una mente propia. Décadas atrás, en la hermosa ciudad de Ámsterdam, tal experiencia resultó en una de las noches más aterradoras de mi vida. Mi mente creó un mundo interno en el que había un sinfín de copias de mí, cada una empeñada en socavar la realidad que experimentaban los demás. Mientras uno de yo se adormecía pensando que

estaba experimentando la "verdadera" realidad, el siguiente yo revelaba el artificio de ese mundo, borrando todo y a todos los que le importaban al yo inicial, y en el proceso revelando otra "verdadera" realidad, que el siguiente yo habitaba con confianza, sólo para que se repitiera la secuencia de pesadilla. Y repetir.

Desde el punto de vista de la física, me había limitado a introducir en mi cerebro una pequeña colección de partículas extrañas. Pero ese cambio fue suficiente para eliminar la impresión familiar de que controlo libremente las actividades que se desarrollan en mi mente. Mientras que la plantilla de nivel reduccionista permanecía en plena vigencia (partículas gobernadas por leyes físicas), la plantilla de nivel humano (una mente fiable dotada de libre albedrío que navega a través de una realidad estable) fue volcada. Por supuesto, no estoy presentando un momento de alteración mental como un argumento a favor o en contra del libre albedrío. Pero la experiencia hizo visceral una comprensión que de otra manera habría permanecido abstracta. Nuestro sentido de quiénes somos, las capacidades que tenemos y la libertad de voluntad que aparentemente ejercemos, todo surge de las partículas que se mueven a través de nuestras cabezas. Si se juega con las partículas, esas cualidades familiares pueden desaparecer. Es una experiencia que ayudó a alinear mi comprensión racional de la física con mi sentido intuitivo de la mente.

La experiencia y el lenguaje cotidiano están llenos de referencias, implícitas y explícitas, al libre albedrío. Hablamos de tomar decisiones y de llegar a decisiones. Hablamos de acciones que dependen de esas decisiones. Hablamos de las implicaciones que esas acciones tienen en nuestras vidas y en las vidas de aquellos a los que tocamos. De nuevo, nuestra discusión sobre el libre albedrío no implica que estas descripciones no tengan sentido o necesiten ser eliminadas. Estas descripciones se cuentan en el lenguaje apropiado para la historia a nivel humano. *Hacemos elecciones*. Tomamos decisiones. *Emprendemos* acciones. Y esas acciones tienen implicaciones. Todo esto es real. Pero debido a que la historia a nivel humano debe ser compatible con el relato reduccionista, necesitamos refinar nuestro lenguaje y supuestos. Necesitamos dejar de lado la noción de que nuestras elecciones y decisiones y acciones tienen su origen último dentro de cada uno de nosotros, que son creadas por nuestros organismos independientes, que surgen de deliberaciones que están fuera del alcance de la ley física. Necesitamos reconocer que aunque la *sensación* de libre albedrío es real, la capacidad de ejercer el libre albedrío -la capacidad de la mente humana de trascender las leyes que controlan la progresión física- no lo es. Si reinterpretamos "libre albedrío" para significar esta sensación, entonces nuestras historias a nivel humano se vuelven compatibles con el relato reduccionista. Y junto con el cambio de énfasis del origen último al comportamiento liberado, podemos abrazar una variedad inexpugnable y de gran alcance de la libertad humana.

Al igual que con el origen de la vida, no hay un momento bien definido en el que surja la conciencia o la autorreflexión o la sensación de libre albedrío. Pero el registro arqueológico sugiere que hace cien mil años, quizás antes, nuestros antepasados habían empezado a tener estas experiencias. Los primeros humanos hace tiempo que se levantaron. Ahora podemos mirar a nuestro alrededor y preguntarnos.

¿Qué hicimos entonces con tales poderes?

6

LENGUAJE E HISTORIA...

De la mente a la imaginación

El patrón es fundamental para la experiencia humana. Sobrevivimos porque podemos sentir y responder a los ritmos del mundo. El mañana será diferente al hoy, pero debajo de la miríada de idas y venidas confiamos en cualidades duraderas. El sol saldrá, las rocas caerán, el agua fluirá. Estos y un sinnúmero de patrones aliados que encontramos de un momento a otro influyen profundamente en nuestro comportamiento. Los instintos son esenciales y la memoria importa porque los patrones persisten.

Las matemáticas son la articulación del patrón. Usando un puñado de símbolos podemos encapsular el patrón con economía y precisión. Galileo lo resumió declarando que el libro de la naturaleza, que él creía que revelaba a Dios con la misma seguridad que la Biblia, está escrito en el lenguaje de las matemáticas. Durante los siglos siguientes, los pensadores han debatido una versión secular del sentimiento. ¿Son las matemáticas un lenguaje desarrollado por la humanidad para describir los patrones que encontramos? ¿O son las matemáticas la fuente de la realidad, haciendo que los patrones del mundo sean la expresión de la verdad matemática? Mis sensibilidades románticas se inclinan hacia lo último. Qué maravilloso es imaginar que nuestras manipulaciones matemáticas tocan la base de la realidad. Pero mi evaluación menos sentimental permite que las matemáticas sean un lenguaje de nuestra propia creación, desarrollado en parte por la sobrecomplacencia de nuestra predilección por los patrones. Después de todo, mucho análisis matemático juega poco papel en la promoción de la supervivencia. Rara fue la comida, y más rara aún fue la oportunidad de reproducirse, que nuestros antepasados aseguraron contemplando números primos o cuadrando el círculo.

En la era moderna, las capacidades de Einstein establecieron un estándar inigualable para aprovechar los ritmos de la naturaleza. Y sin embargo, aunque su legado puede

resumirse en un puñado de frases matemáticas, las incursiones de Einstein en los rincones más recónditos de la realidad no siempre comenzaron con ecuaciones. Ni siquiera con el lenguaje. "A menudo pienso en música", [1] es como él lo describió. "Raramente pienso en palabras." [2] Tal vez su proceso es un reflejo del de Einstein. El mío no. En ocasiones, cuando estoy luchando con un problema difícil, he tenido un repentino destello de perspicacia que refleja algún proceso cerebral por debajo de la conciencia. Pero cuando estoy consciente, incluso cuando utilizo la imaginería mental para ver mi camino hacia una solución, sería una exageración decir que las palabras están ausentes o dibujar una asociación con la música. La mayoría de las veces, avanzo en la física jugando con ecuaciones y recogiendo conclusiones en frases ordinarias que escribo a mano en cuadernos que llenan un estante tras otro. Cuando me concentro, a menudo hablo conmigo mismo, normalmente en silencio, ocasionalmente de forma audible. Las palabras son esenciales para el proceso. Aunque encuentro el resumen de Wittgenstein, "Los límites de mi lenguaje significan los límites de mi mundo" [3] demasiado amplio en su alcance, no tengo ninguna duda de que hay cualidades vitales del pensamiento y la experiencia que están fuera del lenguaje, un punto al que volveremos más adelante, sin el lenguaje mi capacidad para ciertos tipos de maniobras mentales disminuiría. Las palabras no sólo expresan el razonamiento, sino que lo vitalizan. O, como dijo con incomparable gracia Toni Morrison, "Morimos. Ese puede ser el significado de la vida. Pero hacemos lenguaje. Esa puede ser la medida de nuestras vidas".[4]

Excepto por el genio singular, y quizás incluso ahí también, el lenguaje es esencial para desatar la imaginación. Con el lenguaje podemos articular una visión en la que el mundo real proporciona una visión empobrecida de posibilidades mucho más ricas. Podemos conjurar imágenes, auténticas y fantasiosas, en mentes remotas y próximas. Podemos transmitir un conocimiento duramente ganado, sustituyendo la facilidad de la instrucción por la dificultad del descubrimiento. Podemos compartir planes y alinear intenciones, facilitando la acción coordinada. Podemos combinar nuestras capacidades creativas individuales en una fuerza comunal inmensamente consecuente. Podemos mirarnos a nosotros mismos y reconocer que, aunque formados por la evolución, somos capaces de volar más allá de las necesidades de supervivencia. Y podemos maravillarnos de cómo una colección cuidadosamente organizada de gruñidos y deslizamientos y fricativos y paradas puede transmitir la comprensión de la naturaleza del espacio y el tiempo o proporcionar un retrato conmovedor del amor y la muerte: "Wilbur nunca olvidó a Charlotte. Aunque amaba mucho a sus hijos y nietos, ninguna de las nuevas arañas ocupó su lugar en su corazón".

Con el lenguaje, nos embarcamos en la escritura de una narrativa colectiva, una superposición de la historia, para dar sentido a la experiencia.

Primeras palabras

A pesar del palíndromo apócrifo "Señora, soy Adán", nadie sabe cuándo empezamos a hablar o por qué. Darwin especuló que el lenguaje surgió de la canción e imaginó que

aquellos dotados de talentos similares a los de Elvis atraerían más fácilmente a sus parejas y así sembrarían más abundantemente las generaciones subsiguientes de cantantes talentosos. Con el tiempo suficiente, sus melodiosos sonidos se transformarían gradualmente en palabras. [5] Alfred Russel Wallace, el codescubridor de la evolución por selección natural de Darwin, vio las cosas de manera diferente. Estaba convencido de que la selección natural no podía arrojar luz sobre las capacidades humanas para la música, el arte y, en particular, el lenguaje. En el ámbito competitivo de la supervivencia, nuestros antepasados cantores, pintores y charlatanes no estaban, en opinión de Wallace, en mejor situación que sus primos menos extravagantes. Wallace sólo podía ver un camino a seguir: "Por lo tanto, debemos admitir la posibilidad", escribió en la ampliamente leída Revista Trimestral, "de que en el desarrollo de la raza humana, una Inteligencia Superior haya guiado las mismas leyes para fines más nobles". [6] Las leyes de la evolución, de otro modo ciegas, deben haber sido aprovechadas por un poder divino y dirigidas hacia el desarrollo de la comunicación y la cultura. Cuando Darwin leyó el artículo de Wallace, se quedó horrorizado, respondiendo con un "no" [7] fuertemente enfatizado en el margen y señalando a Wallace: "Espero que no hayas asesinado demasiado completamente a tu propio hijo y al mío".[8]

En el siglo y medio transcurrido, los investigadores han desarrollado una variedad de teorías sobre el origen y el desarrollo temprano del lenguaje, pero como en la lucha de equipo, cada propuesta aparentemente convincente se ha encontrado con un nuevo oponente. Hay un consenso mucho mayor sobre el desarrollo temprano del universo. Por extraño que parezca, esto tiene sentido. El nacimiento del universo dejó un tesoro de fósiles. El nacimiento del lenguaje no lo hizo. La omnipresente radiación de fondo de microondas, la particular abundancia de átomos simples como el hidrógeno y el helio, y el movimiento de galaxias distantes proporcionan impresiones directas de los procesos que tuvieron lugar durante la primera época del universo. Las ondas sonoras, la más temprana manifestación del lenguaje, se dispersan rápidamente hacia el olvido. Un momento o dos después de ser producidas, se desvanecen. En ausencia de reliquias tangibles, los investigadores tienen latitud para reconstruir la historia temprana del lenguaje, con el resultado, no es de extrañar, de una profusión de diferentes teorías, a menudo contradictorias.

Aún así, hay un amplio acuerdo en que el lenguaje humano difiere profundamente de cualquier otra variedad de comunicación en el reino animal. Si usted fuera un mono vervet promedio, sería capaz de dar la alerta, advirtiendo a otros en su tribu que un depredador que se acercaba era un leopardo (un quejido corto y agudo), un águila (un resoplido repetido y agudo), o una pitón (onomatopéyicamente etiquetada "chutters"). [9] Pero no se puede discutir el terror que se siente cuando una pitón se deslizó ayer o articular su plan para asaltar un nido de pájaro cercano mañana. Sus habilidades lingüísticas se basarían en una pequeña y cerrada colección de expresiones de significado fijo, todas centradas en lo que está sucediendo aquí y ahora. Lo mismo ocurre con la comunicación evidente dentro de otras especies. Como Bertrand Russell lo resumió, "Un perro no puede relatar su autobiografía; por muy elocuentemente que ladre, no puede decirte que sus padres eran honestos pero pobres". [10] El lenguaje humano es completamente diferente. El lenguaje humano es abierto. En lugar de usar frases fijas y limitadas, combinamos y recombinamos una colección finita

de fonemas para producir secuencias intrincadas, jerárquicas y virtualmente ilimitadas de sonidos que transmiten un espectro virtualmente ilimitado de ideas. Podemos hablar tan fácilmente de la serpiente de ayer o del nido de mañana como podemos describir un delicioso sueño de unicornios voladores o nuestra profunda inquietud mientras la noche se derrama por el horizonte.

Perfore más abajo, y crearemos una controversia. ¿Cómo es que a los pocos años de nacer, sin instrucción formal, nos volvemos fluidos en uno o incluso varios idiomas? ¿Están nuestros cerebros específicamente configurados para adquirir el lenguaje, o la inmersión cultural junto con nuestra propensión general a aprender cosas nuevas ofrece una explicación adecuada? ¿Comenzó el lenguaje humano como colecciones de vocalizaciones con significados fijos, como las llamadas de alarma del mono vervet, que luego se escindieron en palabras, o comenzó el lenguaje como sonidos elementales que se convirtieron en palabras y frases? ¿Por qué tenemos lenguaje? ¿Seleccionó la evolución directamente el lenguaje porque proporciona una ventaja de supervivencia, o es el lenguaje un subproducto de otros desarrollos evolutivos como un mayor tamaño del cerebro? Y a lo largo de todos estos miles de años, ¿de qué hemos estado hablando? ¿Y por qué?

Noam Chomsky, uno de los lingüistas modernos más influyentes, ha sostenido que la capacidad humana para adquirir un idioma depende de que cada uno de nosotros posea una gramática universal bien estructurada, un concepto con un rico linaje histórico que se remonta al filósofo del siglo XIII Roger Bacon, quien llegó a la conclusión de que muchos de los idiomas del mundo comparten una base estructural común. En el uso moderno el término ha sido objeto de varias interpretaciones, y a lo largo de los años Chomsky también ha refinado su significado. En su forma menos polémica, la gramática universal propone que hay algo en nuestra composición neurobiológica innata que proporciona una base para el lenguaje, un impulso cerebral para toda la especie que nos impulsa a todos a escuchar, entender y hablar. ¿De qué otra manera, según el razonamiento, podrían los niños, sujetos al azar, fragmentado y desenfrenado asalto lingüístico de la vida cotidiana, posiblemente internalizar una riqueza de construcciones y reglas gramaticales precisas si no es poseyendo un formidable arsenal mental listo para procesar el ataque verbal? Y como cualquier niño puede aprender cualquier idioma, el arsenal mental no puede ser específico de un idioma; la mente debe ser capaz de aferrarse a un núcleo universal común a todos los idiomas. Chomsky ha propuesto que un evento neurobiológico singular, un "ligero recableado del cerebro" hace quizás ochenta mil años, puede haber dado lugar a que nuestros antepasados adquirieran esta capacidad, desencadenando un big bang cognitivo que despejó el lenguaje en toda la especie.[11]

Los psicólogos cognitivos Steven Pinker y Paul Bloom, pioneros de un enfoque darwiniano del lenguaje, sugieren una historia menos hecha a medida, en la que el lenguaje surgió y se desarrolló a través del patrón familiar de una acumulación gradual de cambios incrementales que cada uno confería un grado de ventaja de supervivencia.[12] Mientras nuestros antepasados cazadores-recolectores vagaban por las llanuras y los bosques, la capacidad de comunicarse -"Grupo de jabalíes pastando a las once en punto", o "Cuidado con Barney, le ha echado el ojo a Wilma", o "Aquí hay una forma mejor de sujetar esa piedra afilada al mango"- era vital para el funcionamiento efectivo del grupo y esencial

para compartir el conocimiento acumulado. Los cerebros capaces de comunicarse con otros cerebros tenían así una ventaja en el ámbito competitivo de la supervivencia y la reproducción, impulsando las capacidades lingüísticas a perfeccionarse y difundirse ampliamente. Otros investigadores identifican un conjunto de adaptaciones, como el control de la respiración, la memorización, el pensamiento simbólico, la conciencia de otras mentes, la formación de grupos, etc., que pueden haber funcionado en conjunto para producir el lenguaje, aunque el propio lenguaje pueda haber tenido poco que ver con el valor de supervivencia de las propias adaptaciones.[13]

También es incierto cuánto tiempo hemos estado hablando. La evidencia lingüística del pasado remoto es virtualmente inexistente, pero al examinar los proxies arqueológicos plausibles, los investigadores han sugerido marcos de tiempo para cuando el lenguaje puede haber surgido por primera vez. Artefactos como herramientas de mano (piedras cinceladas o huesos unidos firmemente a un mango), arte rupestre, grabados geométricos y abalorios proporcionan evidencia de que nuestros antepasados, al menos desde hace cien mil años, se dedicaban a la planificación, el pensamiento simbólico y las interacciones sociales avanzadas. Como nos inclinamos a vincular estas sofisticadas capacidades cognitivas con el lenguaje, podemos imaginar que mientras nuestros antepasados afilaban sus lanzas y hachas o se arrastraban por oscuras cuevas para pintar pájaros y bisontes, parloteaban sobre la caza de mañana o la hoguera de anoche.

Una evidencia más directa de la capacidad de hablar se desprende de una colección diferente de conocimientos arqueológicos. Los científicos que rastrean el crecimiento de las cavidades craneales y los cambios estructurales en la boca y la garganta concluyen que si nuestros antepasados estaban tan inclinados, podrían haber tenido la capacidad fisiológica de conversar hace más de un millón de años. La biología molecular también proporciona pistas. El habla humana requiere un alto grado de destreza vocal y oral, y en 2001 los investigadores identificaron lo que puede ser una base genética esencial para tales habilidades. Estudiando a una familia británica con un trastorno del habla que abarca tres generaciones -dificultad con la gramática y con la coordinación de los complejos movimientos de la boca, la cara y la garganta necesarios para el habla normal- los investigadores se centraron en un percance genético, un cambio a una sola letra en un gen llamado *FOXP2* que se encuentra en el cromosoma 7 humano. [14] El error de instrucción es compartido por los miembros de la familia afligidos y, por lo tanto, ha sido fuertemente implicado en la alteración tanto del lenguaje como del habla. La cobertura de prensa inicial del descubrimiento denominó a *FOXP2* el "gen de la gramática" o el "gen del lenguaje", descripciones que acapararon titulares y que molestaron a los investigadores informados, pero dejando de lado la hipérbole simplificada, el gen *FOXP2* parece ser un componente esencial para el habla y el lenguaje normales.

Curiosamente, se han identificado variaciones cercanas del gen *FOXP2* en muchas especies, desde chimpancés hasta aves y peces, lo que permite a los investigadores rastrear cómo ha cambiado el gen a lo largo de la historia evolutiva. En el caso de los chimpancés, la proteína codificada por su gen *FOXP2 difiere de la* nuestra en sólo dos aminoácidos (de más de setecientos), mientras que la de los neandertales es idéntica a la nuestra. [15] ¿Hablaron

nuestros primos neandertales? Nadie lo sabe. Pero esta línea de investigación sugiere que una base genética para el habla y el lenguaje puede haber sido establecida algún tiempo después de que nos separamos de los chimpancés, hace un puñado de millones de años, pero antes de que nos separáramos de los Neandertales, hace unos seiscientos mil años.[16]

Los vínculos propuestos entre el lenguaje y cada uno de los marcadores históricos - artefactos antiguos, estructuras fisiológicas, perfiles genéticos - son inteligentes pero provisionales. En consecuencia, los estudios basados en estos marcadores dan un amplio margen para cuando las primeras palabras del mundo puedan haber debutado, desde decenas de miles hasta unos pocos millones de años atrás. Como también han señalado los investigadores escépticos, una cosa es tener la capacidad física y la agilidad mental para entablar una conversación y otra muy distinta es hacerlo realmente.

¿Qué, entonces, puede habernos motivado a hablar?

Por qué hablamos

No hay escasez de ideas de por qué nuestros primeros antepasados rompieron el silencio. El lingüista Guy Deutscher señala que los investigadores han señalado las primeras palabras que surgieron "de los gritos y llamadas; de los gestos con las manos y el lenguaje de signos; de la capacidad de imitar; de la capacidad de engañar; del acicalamiento; del canto, el baile y el ritmo; de la masticación, la succión y la lamida; y de casi cualquier otra actividad bajo el sol", [17] una deliciosa lista que probablemente refleja más la teorización creativa que los antecedentes históricos del lenguaje. Aún así, una o tal vez una combinación de éstas puede contar una historia relevante, así que veamos algunas de las sugerencias de dónde vinieron nuestras primeras palabras y por qué se quedaron.

En tiempos pasados, antes de la innovación de enrollar material en un cabestrillo para bebés, una madre que se ocupaba de una tarea a dos manos dejaba a su bebé. Los que lloraban y balbuceaban atraían la atención de la madre y, plausiblemente, la respuesta de la madre podía ser demasiado vocal: cocer, tararear, gruñir, apoyados por expresiones faciales relajantes, gestos con las manos y toques suaves. El balbuceo del bebé y el cariño de la madre habrían resultado en mayores tasas de supervivencia infantil, seleccionando para la vocalización y, según esta propuesta, poniendo a nuestros antepasados en la trayectoria de las palabras y el lenguaje.[18]

O, si la madre no lo hace por ti, ten en cuenta que los gestos proveen un medio directo para comunicar información básica pero vital: asentir con la cabeza hacia este objeto o apuntar a ese lugar. Algunos de nuestros primos primates no humanos, aunque carecen de lenguaje hablado, pueden ser adeptos a comunicar ideas rudimentarias a través de gestos de manos y cuerpo. Y en entornos de investigación controlados, los chimpancés han aprendido cientos de signos con las manos que representan varias acciones, objetos e ideas. Tal vez, entonces, nuestro lenguaje hablado surgió de una fase anterior de la comunicación basada en gestos. A medida que nuestras manos se ocupaban cada vez más de la construcción y el uso de herramientas, y a medida que las reuniones más complejas hacían que los gestos fueran ineficaces o torpes, difíciles de ver por la noche; difíciles de ver las manos y los cuerpos de todos los grupos que están cazando o forrajeando, la vocalización podría haber

ofrecido un medio más eficaz para compartir información. Dado que me encuentro entre aquellos cuyas manos saltan a la acción cada vez que hablan, y a veces antes, esta explicación me parece particularmente plausible.

Sin embargo, si el gesto te deja escéptico, considera la propuesta del psicólogo evolutivo Robin Dunbar de que el lenguaje surgió como un sustituto eficiente de la actividad ampliamente practicada de la limpieza social. [19] Si fueras un chimpancé, harías amigos y establecerías alianzas recogiendo cuidadosamente liendres, piel escamada y otros detritus de la piel de otros en tu comunidad. Algunos miembros de tu grupo te devolverían el favor, mientras que los de mayor rango notarían tu servicio pero dejarían tus liendres intactas. El ritual de aseo es una actividad organizativa, que fomenta y mantiene la jerarquía, las camarillas y las coaliciones del grupo. Los primeros humanos pueden haberse dedicado a un aseo social similar, pero a medida que el tamaño de los grupos crecía, el servicio a las relaciones individuales hubiera requerido una onerosa inversión de tiempo. Las amistades, los acoplamientos y las alianzas son vitales, pero también lo es asegurar que haya suficiente comida para comer. ¿Qué hacer? Bueno, dice Dunbar, este dilema puede haber provocado la aparición del lenguaje. En algún momento nuestros antepasados pueden haber sustituido el intercambio verbal por el aseo manual, permitiéndoles compartir rápidamente información: quién hace qué a quién, quién es engañoso, quién se dedica a la conspiración subversiva, y así sucesivamente -descargando horas de recoger liendres a cambio de minutos de limpiar la suciedad. Estudios recientes han demostrado que hasta un 60 por ciento de nuestra conversación de hoy se dedica al chisme, una cifra asombrosa (especialmente para aquellos de nosotros que apenas dominamos la charla trivial) que algunos investigadores argumentan que refleja el propósito principal del lenguaje en sus inicios.[20]

El lingüista Daniel Dor desarrolla aún más el papel social del lenguaje. En un análisis convincente y de amplio alcance, propone que el lenguaje es una herramienta construida comunalmente con una función específica y profundamente importante: dar a los individuos el poder de guiar la imaginación de los demás. [21] Antes de la aparición del lenguaje nuestro comercio social estaba dominado por nuestras experiencias compartidas. Si ambos veíamos o escuchábamos algo o saboreábamos algo, podíamos referirnos a ello con gestos, sonidos o imágenes. Pero habría sido difícil comunicarse sobre experiencias que no habíamos compartido, sin mencionar el desalentador desafío de ventilar pensamientos abstractos y sensaciones internas. Con el lenguaje, superamos estos desafíos. Con el lenguaje el mercado para nuestro intercambio social creció enormemente: podías usar el lenguaje para describir experiencias que quizás nunca había tenido; a través de las palabras podías conjurarlas en mi mente. Yo podría hacer lo mismo por ti. A lo largo de los milenios, a medida que el bienestar de nuestros antepasados prelingüísticos se hizo cada vez más dependiente de la acción comunitaria coordinada -caza de grandes presas en cooperación, construcción de fuegos controlados, cocina para grandes grupos, cuidado e instrucción compartidos de los jóvenes de [22] años-, rompieron los límites del intercambio no verbal, trajeron el lenguaje al mundo y establecieron una arena social enormemente aumentada que abarcaba no sólo nuestras experiencias compartidas sino también nuestros pensamientos compartidos.

Estas y casi todas las demás propuestas sobre el origen del lenguaje hacen hincapié en la palabra hablada, la manifestación externa del lenguaje. En su forma característicamente icónica, Chomsky hace un giro de 180 grados, proponiendo que en su primera encarnación el lenguaje puede haber facilitado el pensamiento interno. [23 Procesar], planificar, predecir, evaluar, razonar y comprender no son más que algunas de las tareas esenciales que la voz interna entre los oídos de nuestros antepasados podía llevar a cabo con fría confianza una vez que el pensamiento era capaz de aprovechar el lenguaje. El lenguaje hablado, según este punto de vista, fue un desarrollo posterior, como la adición de altavoces de audio a los primeros modelos de ordenadores personales. Es como si mucho antes de que hablaran, nuestros antepasados fueran del tipo profundo y silencioso, deliberando duramente en sus tareas diarias pero guardándose la cogestión para ellos mismos. La posición de Chomsky es polémica. Los investigadores han señalado las características intrínsecas del lenguaje que parecen diseñadas para mapear los conceptos internos a la palabra hablada (notablemente, la fonología y gran parte de la estructura gramatical), sugiriendo que desde el principio el lenguaje ha sido sobre la comunicación externa.

Aunque el origen del lenguaje sigue siendo enigmático, lo que es incuestionable, y de mayor relevancia a medida que avanzamos, es que el lenguaje y el pensamiento proporcionan una potente mezcla. Independientemente de que una versión interna del lenguaje precediera o no a su vocalización externa, y de que esa vocalización fuera o no provocada por una canción o un cuidado infantil o por gestos o chismes o un discurso comunitario o por la posesión de un gran cerebro o algo totalmente distinto, una vez que la mente humana tuvo el lenguaje, el compromiso de nuestra especie con la realidad estaba preparado para un cambio radical.

Ese cambio se basaría en uno de los comportamientos humanos más penetrantes e influyentes: contar historias.

La narración de historias y la intuición

George Smith tenía prisa. Los dedos de su mano derecha golpeaban suave pero persistentemente el borde de ébano incrustado de la larga mesa de caoba. Acababa de enterarse de que Robert Ready, el maestro restaurador de piedra del museo, no volvería hasta dentro de varios días. *Varios días.* ¿Cómo podía esperar? Durante tres años, se había puesto su abrigo, agarró su sándwich cuidadosamente hecho de mermelada y Stilton, y esquivó multitudes y carros mientras corría hacia el Museo Británico, donde pasaría los minutos restantes de su pausa para el almuerzo analizando fragmentos de tablillas de arcilla endurecida recuperadas de una excavación arqueológica en Nínive. Su familia era pobre. Dejó la escuela a los catorce años para aprender a grabar en un banco. Sus perspectivas parecían limitadas. Pero George era un genio. Se había enseñado a sí mismo el asirio antiguo y se había convertido en un experto en la lectura de la escritura cuneiforme. Los conservadores del museo, a quienes les había gustado el extraño niño que andaba por ahí al mediodía, pronto se dieron cuenta de que era más experto en descifrar las tallas cuneiformes que cualquiera de ellas y así llevaron a George a su enclave como empleado a

tiempo completo. Ahora, pero un puñado de años más tarde, George había seleccionado los miles de piezas de arcilla para montar la primera tabla completa y ya había descifrado gran parte de ella. Había encontrado, o creía haber encontrado, un magnífico secreto contado por la serie de cortes triangulares y cuñas - en referencia a un mito del diluvio que precedió al relato de Noé en el Antiguo Testamento - pero necesitaba a Robert Ready para restregar delicadamente la capa de corteza que oscurecía una sección esencial del texto. George podía saborear la victoria. Tembló al imaginar que el descubrimiento lo elevaba a una nueva vida. No podía contenerse. George decidió arriesgarse a frotar la tabla él mismo.

Bien, me estoy dejando llevar. El verdadero George Smith esperó. Días más tarde, Robert Ready regresó y ejercitó sus habilidades, y así se reveló la más antigua de las historias registradas de nuestra especie, la Epopeya Mesopotámica *de Gilgamesh,* compuesta ya en el tercer milenio AC. Mi recuento de forma libre hace lo que los narradores, nosotros los humanos, hemos hecho desde hace mucho tiempo: reelaborar la realidad (lo que se sabe del histórico George Smith [24]), a veces moderadamente (como aquí), a veces agresivamente, a veces por un mayor dramatismo, a veces para la posteridad, a veces por el puro placer de tejer un buen hilo. Se desconoce la motivación artística de los que escribieron *Gilgamesh,* un cuento que probablemente fue moldeado por muchas voces durante muchas generaciones. Pero en esta historia llena de batallas y sueños, arrogancia y celos, corrupción e inocencia, los personajes y sus preocupaciones nos hablan claramente a través de los milenios.

Y eso, realmente, es lo que es tan sorprendente. En los quizás cinco mil años desde que *Gilgamesh* fue establecido, la historia ha sido testigo de la transformación de cómo comemos y nos refugiamos, cómo vivimos y nos comunicamos, cómo nos medicamos y procreamos, y aún así nos reconocemos inmediatamente en la narrativa que se desarrolla. Gilgamesh y su cuñado Enkidu emprendieron una búsqueda que pondría a prueba su coraje, su moralidad y, en última instancia, su sentido de quiénes eran: una *Thelma y una Louise* neolíticas. Al final del viaje, mientras Gilgamesh se cierne sobre la inerte Enkidu, se lamenta en términos desgarradores pero demasiado familiares: "Cubrió, como una novia, el rostro de su amigo, como un águila que le rodeaba. Como una leona privada de sus cachorros, anduvo de un lado a otro, de un lado a otro. Su pelo rizado lo arrancó en mechones, se arrancó sus galas, como si fuera un tabú y las tiró a la basura". [25] Como muchos, he conocido este lugar. Hace décadas, cargando de habitación en habitación en mi pequeño apartamento sin ascensor, sin saber a dónde acudir, busqué frenéticamente escapar de la noticia de que mi padre había muerto repentinamente. Incluso a pesar de cientos, si no miles de generaciones, hay mucho que compartimos con nuestros antepasados.

Y no es sólo que nosotros los humanos nos afligimos y lloramos y nos emocionamos y nos deleitamos y exploramos y nos maravillamos. También compartimos el impulso de expresar todo esto y de procesar todo esto a través de la historia. *Gilgamesh* puede ser la historia escrita más antigua que existe, pero si nuestra especie escribía historias hace 5.000 años, mucho antes seguramente ya las contábamos. Es lo que hacemos. Y lo que hemos hecho durante mucho tiempo. La pregunta es ¿por qué? ¿Por qué evitaríamos cazar más bisontes y jabalíes o recolectar más raíces y frutos para pasar el tiempo imaginando escapadas con dioses petulantes o viajes a mundos extravagantes?

Podrías responder, porque nos gusta la historia. Sí. Claro que sí. ¿Por qué otra razón nos escabulliríamos al cine aunque ese informe se debe entregar mañana? ¿Por qué otra razón se sentiría como un placer culpable dejar de lado el "trabajo real" y seguir con esa novela que hemos estado leyendo o la serie que hemos estado viendo? Sin embargo, ese es el principio de una explicación, no el final. ¿Por qué comemos helado? ¿Porque nos gusta el helado? Sí, claro. Pero, como los psicólogos evolutivos han argumentado convincentemente, el análisis puede ser más profundo. [26]

Aquellos de nuestros antepasados que disfrutaban de la carga de ricas fuentes de energía como la fruta carnosa y las nueces maduras podían afrontar mejor los días de escasez, produciendo así más progenie y propagando una predilección genética por los dulces y las grasas. El anhelo actual por el pistacho Häagen-Dazs, que ya no es elogiado como promotor de la salud, es una reliquia moderna de la búsqueda vital de calorías de antaño. Es la selección darwiniana que se manifiesta en el nivel de inclinación del comportamiento. No es que los genes determinen el comportamiento. Nuestras acciones son el resultado de una compleja amalgama de influencias biológicas, históricas, sociales, culturales y de todo tipo de azar que están impresas en nuestra disposición de partículas. Pero nuestros gustos e instintos son una parte esencial de esa mezcla, y al servicio de una mejor supervivencia la evolución tuvo una fuerte influencia en su formación. Podemos aprender nuevos trucos pero, genéticamente y por lo tanto instintivamente hablando, somos perros viejos.

La pregunta, entonces, es si la evolución darwiniana puede iluminar no sólo nuestros gustos culinarios sino también los literarios. ¿Por qué nuestros antepasados se vieron atraídos a gastar preciosos recursos de tiempo, energía y atención contando historias que, a primera vista, no parecen mejorar nuestras perspectivas de supervivencia? Las historias ficticias son particularmente desconcertantes. ¿Qué utilidad evolutiva podría surgir de seguir las hazañas de personajes imaginarios que se enfrentan a desafíos imaginarios en mundos inexistentes? Con su implacable paseo aleatorio a través del paisaje adaptativo, la evolución es efectiva para esquivar las predisposiciones conductuales extravagantes. Una mutación genética que nos alejó del instinto de contar historias, liberando tiempo para afilar unas pocas lanzas extra o para buscar un par de cadáveres de búfalo extra, parece ofrecer una ventaja de supervivencia que, con el tiempo, ganaría. Pero no fue así. O, por alguna razón, es una oportunidad que la evolución perdió.

Los investigadores han tratado de entender por qué, pero las pistas son escasas. Hay muy pocas pruebas para establecer la prevalencia o la utilidad de la narración de historias entre los antepasados que se remontan a miles de generaciones. Esto pone de relieve un desafío general que impregna la investigación que busca una base evolutiva para el comportamiento, uno que encontraremos en varias formas en los capítulos que siguen. Desde el punto de vista de la selección natural, lo que importa es el impacto que tal o cual

comportamiento habría tenido en las perspectivas de supervivencia y reproducción de nuestros antepasados durante la mayor parte de su historia. Un relato fidedigno requiere, por lo tanto, una comprensión refinada de la mentalidad antigua mientras negociaba el entorno ancestral. Pero la historia registrada sólo proporciona información del último cuarto del 1% de los aproximadamente dos millones de años que se remontan a las primeras migraciones humanas fuera de África. Los investigadores han desarrollado sondas indirectas del pasado, incluyendo el examen detallado de artefactos antiguos, extrapolaciones de análisis etnográficos de los grupos de cazadores-recolectores que quedan hoy en día, y estudios de la arquitectura del cerebro en busca de ecos cognitivos de antiguos desafíos de adaptación. El mosaico de pruebas limita la teorización, pero aún así permite una variedad de perspectivas.

Una de esas perspectivas sostiene que buscar un papel adaptable para la narración de historias es buscar una mejor aptitud en el lugar equivocado. Una determinada predisposición de comportamiento puede ser un mero producto de otros desarrollos evolutivos - desarrollos que mejoraron la supervivencia y por lo tanto evolucionaron de la manera habitual por selección natural. La directriz general, enfatizada en un famoso artículo de Stephen Jay Gould y Richard Lewontin, es que no se puede elegir la evolución. [27] La evolución a veces ofrece sólo paquetes de ofertas. Los grandes cerebros de la variedad humana gris-blanca, repletos de neuronas densamente conectadas, son realmente buenos para la supervivencia, pero tal vez algo intrínseco a su diseño asegura que se deleiten con la historia. Considere, por ejemplo, que nuestro éxito como seres sociales depende en parte de tener buena información: quién está arriba, quién está abajo, quién es fuerte, quién es vulnerable, quién es digno de confianza. Debido a la utilidad adaptativa de tal información, nos inclinamos a prestar atención cuando está disponible.

Y cuando se posee tal información, no es raro compartirla a cambio de pulir nuestro estatus social. Como la ficción está repleta de información de este tipo, nuestras mentes moldeadas para adaptarse pueden estar preparadas para animarse, escuchar y repetir, aunque la narración sea extravagante. La selección natural sonreiría a los cerebros a medida que se hicieran más adeptos a la vida social mientras giran los ojos al escuchar sus obsesivos relatos.

¿Convencido? Muchos -y me cuento en este grupo- no encuentran plausible que, a pesar de su capacidad de innovación, el cerebro se haya encerrado en un comportamiento completamente dominante, totalmente central y, sin embargo, adaptablemente irrelevante. Aspectos de la experiencia de contar historias pueden ser parte de un paquete evolutivo, pero si contar historias y escucharlas y volver a contarlas se convirtiera en una charla secundaria, la evolución, uno anticipa, habría encontrado una manera de deshacerse de este tic derrochador. ¿Cómo podría entonces la narración de historias ganarse su sustento adaptable?

Al buscar una respuesta, debemos tener en cuenta las reglas del juego. Para muchos comportamientos es muy fácil inventar papeles de adaptación a posteriori. Y como no podemos probar tales sugerencias repitiendo el desarrollo evolutivo, existe el peligro de que nos quedemos con una colección de historias de "simplemente así". Las propuestas más convincentes son aquellas que comienzan con un desafío de adaptación dado -uno que si se supera resultaría en un mayor éxito reproductivo- y argumentan que un comportamiento particular (o conjunto de comportamientos) está intrínsecamente bien diseñado para enfrentar ese desafío. La explicación darwiniana de nuestro gusto por los dulces es ejemplar. Los humanos requieren un mínimo de calorías para sobrevivir y reproducirse. Ante el potencial de un devastador déficit en la ingesta calórica, la preferencia por alimentos densamente llenos de azúcares tiene un valor adaptativo manifiesto. Si se diseñara la mente humana, consciente de las necesidades fisiológicas del cuerpo humano y de la naturaleza del entorno ancestral, es fácil imaginar que se programaría el cerebro humano para animar a su cuerpo a comer fruta siempre que esté disponible. Que la selección natural llegara a esta misma estrategia no es para nada sorprendente. La cuestión es si hay consideraciones adaptativas análogas que podrían llevarte a programar la mente humana para crear, contar y escuchar historias.

Hay. La narración de cuentos puede ser la forma que tiene la mente de ensayar para el mundo real, una versión cerebral de las actividades lúdicas documentadas a través de numerosas especies que proporcionan un medio seguro para practicar y refinar las habilidades críticas. El destacado psicólogo y hombre de mente Steven Pinker describe una versión particularmente magra de la idea: "La vida es como el ajedrez, y las tramas son como esos libros de famosos juegos de ajedrez que los jugadores serios estudian para estar preparados si alguna vez se encuentran en dificultades similares". [28] Pinker imagina que a través de la historia cada uno de nosotros construye un "catálogo mental" de respuestas estratégicas a las potenciales bolas curvas de la vida, que luego podemos consultar en momentos de necesidad. Desde esquivar a los desviados miembros de la tribu hasta cortejar a posibles compañeros, organizar cacerías colectivas, evitar las plantas venenosas, instruir a los jóvenes, repartir los escasos suministros de alimentos, etc., nuestros antepasados se

enfrentaron a un obstáculo tras otro a medida que sus genes buscaban una presencia en las generaciones siguientes. La inmersión en historias ficticias que lidian con una amplia gama de desafíos similares habría tenido la capacidad de refinar las estrategias y respuestas de nuestros antepasados. Codificar el cerebro para que se dedique a la ficción sería, por tanto, una forma inteligente de dar a la mente, de forma barata, segura y eficiente, una base más amplia de experiencia desde la que operar.

Algunos estudiosos de la literatura se han echado atrás, señalando que las estrategias que siguen los personajes ficticios que se enfrentan a desafíos imaginarios no son, en general, transferibles a la vida real o, al menos, no de forma deliberada. [29] "Podrías terminar corriendo por ahí como el cómicamente loco Don Quijote o la trágicamente engañada Emma Bovary -ambos se extravían porque confunden la fantasía literaria con la realidad", es como Jonathan Gottschall resume deportivamente la crítica. [30] Pinker, por supuesto, no sugería que copiáramos las acciones que encontramos en las historias sino que aprendiéramos de ellas - un enfoque, como señala Gottschall, que tal vez se transmite más plenamente por un modesto cambio de metáfora a uno introducido por el psicólogo y novelista Keith Oatley: [31] En lugar de un simulador de vuelo de pensamientos de archivo mental. Las historias proporcionan reinos fabricados en los que ensombrecemos personajes cuyas experiencias superan con creces las nuestras. A través de ojos prestados protegidos por el cristal templado de la historia, observamos íntimamente una abundancia de mundos exóticos. Y es a través de estos episodios simulados que nuestra intuición se expande y refina, haciéndola más aguda y flexible. Cuando nos enfrentamos a lo desconocido, no iniciamos búsquedas cognitivas que buscan a una querida Abadía de la mente. En su lugar, a través de la historia interiorizamos un sentido más matizado de cómo responder y por qué, y ese conocimiento intrínseco guía nuestro comportamiento futuro. Cultivar un sentido innato de pasión heroica está muy lejos de inclinarse hacia los molinos de viento - y esa fue mi opinión, y la de muchos otros también, al pasar la última página en las aventuras de Alonso Quijano.

Con el simulador de vuelo como nuestra metáfora para la utilidad adaptativa de la historia, ¿cómo programaríamos el simulador mismo? ¿Qué tipo de historias lo haríamos funcionar? Podemos tomar la respuesta de la primera página del currículum de Escritura Creativa 101. Un axioma de la narración de historias es la necesidad de conflicto. La necesidad de dificultad. La necesidad de problemas. Nos atraen los personajes que buscan resultados que requieren superar obstáculos traicioneros, externos e internos. Sus viajes, literales y simbólicos, nos mantienen en el borde de nuestros asientos o pasando páginas furiosamente. Sin duda, la más cautivante de las historias invoca enfoques sorprendentes, entretenidos e incluso impresionantes de los personajes, la trama y la propia técnica de la narración, pero para muchos, eliminan el conflicto y los efluvios de la historia. No es una coincidencia que lo mismo ocurra con la utilidad darwiniana del contenido que se ejecuta en el simulador de vuelo narrativo. Sin conflicto, sin dificultad, sin problemas, el valor adaptativo de la historia también se esfumaría. Un Josef K. que se contenta con confesar un crimen sin nombre y cumplir un castigo injustificado sería una lectura rápida. Y sin otros ajustes narrativos, uno menos impactante. Como lo sería seguir a una Dorothy que

alegremente entrega las zapatillas de rubí, sale del camino de ladrillos amarillos, y se asimila a Munchkinland. Cielos despejados, motores perfectos de libro, y pasajeros modelo no son las simulaciones que mejoran la preparación del piloto. La utilidad de ensayar para el mundo real es encontrar situaciones a las que sería difícil responder sin preparación.

Es una perspectiva de la historia que también puede arrojar luz sobre por qué tú y yo y todos los demás pasamos un par de horas cada día inventando cuentos que rara vez recordamos y más raramente compartimos. De día me refiero a la noche, y los cuentos son los que producimos durante el sueño REM. Más de un siglo después de *La interpretación de los sueños de* Freud, todavía no hay consenso sobre por qué soñamos. Leí el libro de Freud para una clase de secundaria llamado Higiene (sí, así se llamaba realmente), un requisito un tanto bizarro enseñado por los profesores de gimnasia y entrenadores deportivos de la escuela que se centraba en los primeros auxilios y en las normas comunes de limpieza. A falta de material para llenar un semestre entero, la clase se llenó con presentaciones obligatorias de los estudiantes sobre temas considerados poco relevantes. Elegí el sueño y los sueños y probablemente me lo tomé demasiado en serio, leyendo a Freud y pasando horas extraescolares peinando la literatura de investigación. El momento de sorpresa para mí, y para la clase también, fue el trabajo de Michel Jouvet, que a finales de los 50 exploró el mundo de los sueños de los gatos. [32] Al dañar parte del cerebro del gato (el locus coeruleus, si te gusta ese tipo de cosas), Jouvet eliminó un bloqueo neural que normalmente impide que los pensamientos oníricos estimulen la acción corporal, lo que da como resultado gatos dormidos que se agachan y arquean y sisean y patalean, presumiblemente reaccionando a depredadores y presas imaginarios. Si no supieras que los animales están dormidos, podrías pensar que están practicando una kata felina. Más recientemente, estudios en ratas usando sondas neurológicas más refinadas han demostrado que sus patrones cerebrales al soñar coinciden tan estrechamente con los registrados cuando están despiertos y aprendiendo un nuevo laberinto que los investigadores pueden seguir el progreso de la mente de la rata que sueña mientras vuelve sobre sus pasos anteriores. [33] Cuando los gatos y las ratas sueñan, seguramente parece que están ensayando comportamientos relevantes para la supervivencia.

Nuestro antepasado común con los gatos y roedores vivió hace unos setenta u ochenta millones de años, por lo que extrapolar una conclusión especulativa entre especies separadas por decenas de miles de milenios viene con amplias etiquetas de advertencia. Pero uno puede imaginar que nuestras mentes impregnadas de lenguaje pueden producir sueños con un propósito similar: proporcionar ejercicios cognitivos y emocionales que mejoren el conocimiento y ejercitar la intuición - sesiones nocturnas en el simulador de vuelo de la historia. Tal vez por eso, en una vida típica, cada uno de nosotros pasa siete años con los ojos cerrados y el cuerpo paralizado, consumiendo nuestros cuentos de autor.[34]

Intrínsecamente, sin embargo, la narración de historias no es un medio solitario. La narración de historias es nuestro medio más poderoso para habitar otras mentes. Y como especie profundamente social, la capacidad de entrar momentáneamente en la mente de otro puede haber sido esencial para nuestra supervivencia y nuestro dominio. Esto ofrece una lógica de diseño relacionada para codificar la historia en el repertorio de comportamiento

humano para identificar, es decir, la utilidad adaptativa de nuestro instinto de contar historias.

La narración de historias y otras mentes

El discurso profesional entre los físicos generalmente implica una jerga especializada articulada en un confeti de ecuaciones. No es el tipo de material que atraería a los que se apiñan alrededor de la fogata para inclinarse. Pero si sabes cómo leer las ecuaciones e interpretar la jerga, las historias que cuentan pueden ser conmovedoras. En noviembre de 1915, cuando un agotado Albert Einstein, a punto de completar su teoría general de la relatividad, manipuló las ecuaciones para explicar el antiguo enigma de que la órbita de Mercurio se desviara ligeramente de las predicciones newtonianas, se conmovió tanto que experimentó palpitaciones del corazón. Había estado navegando a través de las traicioneras aguas de las matemáticas complejas durante casi una década, y el resultado de ese cálculo fue similar al primer avistamiento de tierra. Parafraseando la posterior evaluación de Alfred North Whitehead, significaba que la audaz búsqueda de Einstein había llegado a salvo a las costas del entendimiento.[35]

Nunca he tenido un descubrimiento tan monumental. Pocos lo han hecho. Pero incluso descubrimientos más prosaicos pueden proporcionar una emoción similar. En esos momentos, hay una sensación de profunda conexión con el cosmos. Eso, realmente, es de lo que tratan las historias incrustadas en las matemáticas abstractas y el lenguaje especializado. Las historias dan un relato íntimo del universo, o algo dentro del universo, como nace, como envejece, como se transforma. Las historias proporcionan un medio para experimentar el universo desde una perspectiva que de otra manera es inalcanzable. Proporcionan una puerta de entrada a reinos de la realidad que, en el más gratificante de los ejemplos, son totalmente inesperados. A través de las matemáticas, confirmadas por el experimento y la observación, se nos da permiso para comunicarnos con un extraño y maravilloso cosmos.

Las historias que hemos estado contando en lenguajes naturales durante miles de años juegan un papel análogo. A través de la historia nos liberamos de nuestra habitual perspectiva singular y por un breve momento habitamos el mundo de una manera diferente. Lo experimentamos a través de los ojos y la imaginación del narrador. El simulador de vuelo de la historia es nuestro portal a los mundos idiosincrásicos que se desarrollan en las mentes cercanas. En palabras de Joyce Carol Oates, la lectura "es el único medio por el que nos deslizamos, involuntariamente, a menudo sin ayuda, en la piel de otro; la voz de otro; el alma de otro... para entrar en una conciencia que no conocemos". [36] Sin la historia, los matices de otras mentes serían tan opacos como el micromundo sin el conocimiento de la mecánica cuántica.

¿Hay alguna consecuencia evolutiva en esta calidad distintiva de la historia? Los investigadores han imaginado que sí. Hemos prevalecido, en gran parte, porque somos una especie intensamente social. Somos capaces de vivir y trabajar en grupo. No en perfecta armonía, pero con la suficiente cooperación como para cambiar completamente el cálculo

de la supervivencia. No se trata sólo de la seguridad en los números. Es innovar, participar, delegar y colaborar en los números. Y esencial para una vida de grupo tan exitosa son las ideas de la variedad de experiencias humanas que hemos absorbido a través de la historia. Como señaló el psicólogo Jerome Bruner, "Organizamos nuestra experiencia y nuestra memoria de los acontecimientos humanos principalmente en forma de narración", [37] lo que le lleva a dudar de que "esa vida colectiva sería posible si no fuera por nuestra capacidad humana de organizar y comunicar la experiencia en forma de narración". [38] A través de la narrativa exploramos el rango del comportamiento humano, desde la expectativa social hasta la transgresión atroz. Somos testigos de la amplitud de la motivación humana, desde la ambición elevada hasta la brutalidad reprobable. Encontramos el alcance de la disposición humana desde la victoria triunfante hasta la pérdida desgarradora. Como ha subrayado el erudito literario Brian Boyd, las narraciones hacen así "el paisaje social más navegable, más expansivo, más abierto con posibilidades", inculcándonos un "ansia de comprender nuestro mundo no sólo en términos de nuestra propia experiencia directa, sino a través de las experiencias de los demás, y no sólo de los verdaderos otros". [39] Ya sea que se cuenten a través de mitos, historias, fábulas o incluso relatos embellecidos de eventos cotidianos, las narraciones son la clave de nuestra naturaleza social. Con las matemáticas comulgamos con otras realidades; con las historias comulgamos con otras mentes.

Cuando era niño, solía ver la serie original de *Star Trek* con mi padre, una tradición que he repetido con mi propio hijo. Los cuentos de moralidad y la ópera espacial tienen una fuerte influencia en aquellos que disfrutan de la exploración heroica servida con dosis de reflexión filosófica. Uno de los episodios más fascinantes, "Darmok", de la *Nueva Generación*, muestra un extraordinario papel en la creación de la civilización. Los Tamarianos, una raza alienígena de humanoides, se comunican únicamente a través de la alegoría, por lo que el uso directo del lenguaje del Capitán Picard es tan desconcertante para ellos como lo es para él su constante referencia a una obra de historias desconocidas. Picard finalmente capta su visión del mundo basada en la alegoría y establece un encuentro entre especies cruzadas de las mentes al relatar la *epopeya de Gilgamesh.*

Para los Tamarianos, los patrones de vida y la comunidad están impresos en una colección de historias compartidas. Nuestra plantilla mental es menos monótona, pero aún así, la narración proporciona uno de nuestros esquemas conceptuales primarios. El antropólogo John Tooby y la psicóloga Leda Cosmides, pioneros de la psicología evolutiva, sugieren el porqué: "Evolucionamos no hace mucho tiempo a partir de organismos cuya única fuente de información (no innata) era la propia experiencia del individuo". [40] Y la experiencia, ya sea luchando con las multitudes de la actual Times Square o coordinando una caza en grupo en las llanuras del África cenozoica, proporciona información en paquetes de historias. Si poseyéramos la visión extravagante, sobrehumana y reveladora de partículas que invoqué en el capítulo anterior, los paquetes de experiencia podrían tener un carácter diferente: tal vez organizaríamos nuestros pensamientos y recuerdos en términos de trayectorias de partículas o funciones de ondas cuánticas. Pero con las percepciones humanas ordinarias, la paleta de la experiencia está coloreada en la narración, y así nuestras mentes están adaptadas para pintar el universo en la historia.

Sin embargo, ten en cuenta que la forma es una cosa y el contenido otra. Mientras que la experiencia ha inculcado un encanto con la estructura de la historia, usamos la narrativa para organizar nuestra comprensión más allá de los límites de los encuentros humanos. Los avances científicos proporcionan un ejemplo excelente. Las historias de una especie solitaria que se propone conquistar los grandes misterios de la realidad y que regresa con algunas de las más sorprendentes percepciones pueden ser, en efecto, materia de drama y heroísmo. Pero el estándar de éxito para el contenido científico de estas historias son polos aparte de las medidas que aportamos a nuestras odiseas humanas. La razón de ser de la ciencia es correr el velo que oculta una realidad objetiva, por lo que los relatos científicos deben ajustarse a las normas de la lógica y ser probados a través de un escrutinio experimental replicable. Ese es el poder pero también la limitación de la ciencia. Al adherirse rigurosamente a un estándar que minimiza la subjetividad, la ciencia se fija en resultados que trascienden a cualquier miembro de la especie. La profundamente importante ecuación cuántica de Schrödinger nos dice mucho sobre los electrones, y lo emocionante que es tener una ecuación que delinea las idas y venidas de estas partículas raras con mayor precisión que cualquier otro relato de lo que ocurre en el planeta, pero las matemáticas no nos dicen mucho sobre Schrödinger o el resto de nosotros. Es un precio que la ciencia paga con orgullo por una crónica cuántica que puede resultar relevante más allá de nuestro pequeño rincón de la realidad, tal vez dominando todo el espacio y todo el tiempo.

Las historias que contamos de las idas y venidas de los personajes, ya sean reales o ficticios, tienen una preocupación diferente. Iluminan la riqueza de nuestra ineluctablemente circunscrita y completamente subjetiva existencia. El impresionante relato de Ambrose Bierce, que ocupa un breve momento en una ejecución militar en el puente de Owl Creek, destila lo que Ernest Becker describió como el "insoportable anhelo interior por la vida". [41] A través de la historia, somos testigos de una versión amplificada de ese anhelo. Y mientras imaginamos a Peyton Farquhar exhausto pero eufórico extendiendo su mano para agarrar a su esposa, y la soga lo sacude bruscamente, y a nosotros, de su imaginaria fuga, nuestro sentido de lo que significa ser humano se ramifica. A través del lenguaje, la historia explota los límites que de otra manera serían impuestos por nuestras propias y estrechas experiencias. A medida que las palabras magistralmente elegidas dirigen nuestra imaginación, ganamos un sentido más profundo de nuestra humanidad común y una comprensión más matizada de cómo sobrevivir como especie social.

Ya sea que se trate de hechos o ficción, lo simbólico o lo literal, el impulso narrativo es un universal humano. Tomamos el mundo a través de nuestros sentidos, y al buscar coherencia y prever la posibilidad buscamos patrones, inventamos patrones e imaginamos patrones. Con la historia articulamos lo que encontramos. Es un proceso continuo que es central para la forma en que organizamos nuestras vidas y damos sentido a la existencia. Las historias de personajes, reales y de fantasía, que responden a situaciones familiares y extraordinarias, proporcionan un universo virtual de compromiso humano que infunde nuestras respuestas y refina nuestras acciones. En algún momento del futuro lejano, si finalmente recibimos visitantes de un mundo distante, nuestras narraciones científicas contendrán verdades que probablemente ellos también habrán descubierto, y por lo tanto

tendrán poco que ofrecer. Nuestras narrativas humanas, como las de Picard y los Tamarianos, les dirán quiénes somos.

Cuentos Míticos

Dentro de la comunidad de científicos, los hallazgos de la investigación ganan dinero al explicar datos desconcertantes, o al ofrecer resoluciones a problemas teóricos espinosos, o al permitirnos realizar hazañas que antes estaban fuera de nuestro alcance. La gran mayoría de los desarrollos científicos siguen siendo competencia de los expertos, pero algunos consiguen elevarse por encima de los demás y lograr un amplio impacto cultural. En su mayor parte, se trata de desarrollos relevantes para grandes preocupaciones que trascienden el detalle científico esencial: ¿Cómo comenzó el universo? ¿Cuál es la naturaleza del tiempo? ¿Es el espacio lo que parece ser? Si absorbes las respuestas más refinadas de la ciencia a estas grandes preguntas, tu perspectiva de la realidad cambiará casi con toda seguridad. Que somos un planeta menor orbitando una estrella promedio formada después de una estupenda expansión del espacio primordial es una realización que constantemente informa mis pensamientos sobre cómo encajamos en el gran cuadro. Que el tiempo transcurre a un ritmo diferente para mí que para cualquier otra persona que no se mueva precisamente conmigo es un hecho sorprendente sobre el que reflexiono sin cesar. Que nuestra realidad aparentemente tridimensional pueda ser una fina rebanada a través de una gran extensión espacial es una posibilidad emocionante que me deleito en imaginar.

A lo largo de milenios, las culturas también han producido historias particulares que también han logrado elevarse por encima de las demás y lograr un amplio impacto en la visión de la realidad de su comunidad. Estos son mitos e historias de una cultura que se tienen en cuenta lo suficiente como para obtener un sentido de lo sagrado. Es notoriamente difícil definir el mito, pero lo tomaremos para denotar historias que invocan a agentes sobrenaturales para explorar las grandes preocupaciones de la cultura: su origen, sus rituales practicados durante mucho tiempo, sus formas particulares de imponer el orden en el mundo. A través de su longevidad, su amplio atractivo y su cartera de explicaciones fundamentales, los mitos se convierten en la base de un patrimonio compartido, un corpus de tragedia y triunfo, de crónica y fantasía, de aventura y reflexión que define a un pueblo y da forma a una sociedad.

Hay una larga historia de eruditos que han desarrollado formas perspicaces de leer e interpretar el mito. A principios del siglo XX, el antropólogo Sir James Frazer propuso que los mitos surgen de los intentos de explicar los desconcertantes fenómenos de la vida y la naturaleza que encontraron nuestros antiguos hermanos. El psicoanalista Carl Jung creía que a través de los arquetipos -patrones universales que, suponía, son inherentes a la mente inconsciente- los mitos expresan cualidades compartidas de la experiencia humana. Joseph Campbell abogaba por un "monomito", un patrón maestro para las historias mitológicas en las que un personaje reacio recibe una llamada a la acción, emprende una aventura plagada de peligros y ritos de paso que desafían a la muerte, y finalmente regresa a casa, un héroe renacido cuyo viaje da a nuestro sentido de la realidad una fuerte sacudida. [42] Más recientemente, el filólogo Michael Witzel ha sugerido que una plantilla universal emerge más claramente no a nivel de los mitos individuales sino sólo cuando consideramos los

mitos colectivos de tradiciones enteras - una línea de historia concatenada, sugiere, que se extiende desde el comienzo del mundo hasta su final. Invocando la lingüística, la genética poblacional y la arqueología, Witzel argumenta que las cualidades comunes de estas narraciones pueden rastrearse a una forma anterior de mitología que se originó en África, quizás tan atrás como hace cien mil años.[43]

Estas propuestas, y otras demasiado numerosas para mencionarlas, incitan a la controversia y a las críticas apasionadas. Tienen sus defensores y detractores; se levantan y caen. Algunos estudiosos sugieren que aunque el atractivo de una única explicación general del mito es fuerte, ayudaría a identificar las cualidades omnipresentes que dieron forma a nuestro antiguo patrimonio, la complejidad de la vida humana tal como se desarrolló a través de una historia poco iluminada e incierta puede no prestarse a una explicación singular. Para nuestro propósito aquí, el alcance explicativo puede ser más limitado. La académica y autora religiosa Karen Armstrong ha ofrecido el más escueto de los resúmenes, señalando que los mitos están "casi siempre arraigados en la experiencia de la muerte y el temor a la extinción", [44] y aunque seamos un poco más conservadores y suavicemos "casi siempre" a "a menudo" o "en muchos casos", todavía tenemos una fuerte luz guía que nos lleva hacia adelante.

Algunos ejemplos: Cuando Gilgamesh oye hablar de un hombre al que los dioses aparentemente le concedieron la inmortalidad, no se detiene ante nada, viajando a través de un vasto desierto, mirando fijamente a los monstruos escorpión, negociando las Aguas de la Muerte, para aprender el secreto para escapar del fin que de otro modo sería inevitable. La muerte es central en el cuento hindú de la diosa Kali, cuya perfección enfurece tanto a sus divinos compatriotas que le cortan la cabeza con un rayo; [45] la muerte es el núcleo del mito de la creación de Kono en el que Sa, la deidad de la muerte, cree que su hija ha sido secuestrada por el dios Alatangana y por venganza decreta la mortalidad para toda la humanidad; es un tema significativo en la historia de Oceanía de Ma-ui, que pasa por las feroces mandíbulas de la dormida diosa duende, la Gran Hina de la Noche, que intenta asegurar la inmortalidad arrancándole el corazón, pero Hina se despierta y con sus dientes afilados lo hace pedazos. [46] Abre al azar tu antología favorita de mitos del mundo, y no tendrás que andar muy lejos antes de llegar a las puertas de la muerte. Estos cuentos de personajes que luchan por sus vidas y que traen la muerte al mundo se repiten a través de las muchas historias que cuentan la aniquilación del mundo entero. Como señala Witzel, esa destrucción "puede tener lugar como una conflagración mundial final: la *Götterdämmerung* o Ragnarök en el Edda, el metal fundido en el mito zoroastriano, la danza destructiva y el fuego de Śiva en la India, el fuego en el mito de Munda, el fuego/agua y así sucesivamente en los mitos mayas y otros mitos mesoamericanos, y la destrucción final de la tierra por parte de Atum en Egipto". [47] Y si eso te deja con ganas de más, hay numerosas historias que cuentan de otras destrucciones que hacen un uso generoso del hielo, inviernos interminables, y, populares en todo el mundo, inundaciones.

¿Qué está pasando aquí? ¿Por qué tanto peligro, muerte y destrucción? La narración invita al conflicto y a los problemas; a menos que nos comprometamos a cambiar las normas de la narración, sin estos elementos nos será difícil encontrar una historia que

contar. Si se combina esto con las preocupaciones más amplias de la vida en el núcleo del mito -orígenes del lugar o la gente y fundamentos de las formas de ser- y los dilemas inherentes a la historia se llevan al extremo. La progresión difícilmente podría ser de otra manera. En el momento en que tenemos el lenguaje y en el momento en que contamos historias, hemos adquirido la capacidad de vivir más allá del momento. Somos capaces de navegar por el pasado y el futuro con facilidad. Somos capaces de planificar y diseñar, de coordinar y comunicar, de anticipar y preparar. La utilidad de estas capacidades es manifiesta, pero con tal agilidad mental también vivimos con la memoria de los que fueron pero ya no son. Inferimos el patrón, nunca quebrantado, de que cada vida termina. Reconocemos que la vida y la muerte están encerradas en un abrazo impenetrable. Son cualidades duales de la existencia. Reflexionar sobre los orígenes es despertar preguntas sobre los finales. Reflexionar sobre cómo vivir una vida es reflexionar sobre la ausencia de vida. La inevitabilidad de la muerte es una realización imponente para nosotros en el aquí y ahora, y, uno puede imaginar, sólo más durante las épocas en que el final podría llegar aún más caprichosamente. No es de extrañar que la muerte y la destrucción hayan adquirido prominencia temática.

¿Pero por qué poblar estos antiguos cuentos con gigantes maníacos, serpientes que respiran fuego, hombres con cabeza de toro y similares? ¿Por qué cuentos fantásticos aterradores en vez de un realismo aterrador? ¿Por qué ir a *Poltergeist* y *El Exorcista* en vez de salvar al *soldado Ryan* y a *los perros del pantano*? El antropólogo cognitivo Pascal Boyer, basándose en los primeros trabajos del científico cognitivo Dan Sperber,[48] sugiere una respuesta. Para que un concepto se apodere de nuestra atención con suficiente fuerza como para que lo recordemos y lo transmitamos a los demás, el concepto debe ser lo suficientemente novedoso como para ofrecer sorpresa pero no tan escandaloso como para que lo consideremos inmediatamente ridículo. Boyer argumenta que una determinada reflexión cae en el punto dulce cognitivo cuando es "mínimamente contraintuitiva", lo que significa que viola una o quizás tantas como dos de nuestras expectativas profundamente arraigadas. [49] ¿Gente invisible? Claro, siempre y cuando la invisibilidad sea la única característica contraintuitiva. ¿Un río que responde a los problemas de cálculo cantándoles el tema de *M*A*S*H*? Tonto, y por eso es rechazado por casi todo el mundo y olvidado rápidamente. Alineados con los temas más grandes de los cuentos míticos, los protagonistas que encontramos son más grandes que la vida pero construcciones mínimamente contrarias a la intuición de la imaginación humana. No es de extrañar que estos protagonistas tengan formas físicas, procesos de pensamiento e incluso perfiles de personalidad que, como mínimo, son completamente familiares, aunque sus poderes superen las expectativas basadas en cualquier cosa que hayamos encontrado.

El lenguaje proporciona otro cilindro que impulsa el motor creativo del mito. Una vez que tenemos la capacidad de describir la estructura de las cosas ordinarias - tormentas, árboles ardientes, serpientes deslizándose, y así sucesivamente - el lenguaje proporciona una narración preparada, Sr. Cabeza de Papa, permitiéndonos mezclar y combinar libremente. Las rocas gigantes y la gente que habla no son más que un intercambio de la más cautivante mezcla lingüística de rocas que hablan y gente gigante. El lenguaje desata la capacidad cognitiva de imaginar todo tipo de combinaciones no ensayadas que nos guían

hacia la novedad. [50] Las mentes que adquirieron este poder fueron mentes capaces de ver viejos problemas de una nueva manera. Son mentes que innovarían. Son mentes que, con el tiempo, controlarían y remodelarían el mundo.

Sembrar el remolino creativo, también, es nuestra teoría de la mente, nuestra tendencia innata a atribuir una mente a cualquier cosa que encontremos que incluso insinúe tener agencia. Como en nuestra anterior discusión sobre la conciencia, cuando nos encontramos con otras personas, incluso a distancia y sin compromiso directo, inmediatamente las dotamos de mentes más o menos como la nuestra. Evolutivamente hablando, eso es algo bueno. Otras mentes pueden generar comportamientos que es mejor anticipar. Lo mismo ocurre con los animales, y así instintivamente les atribuimos intenciones y deseos también. Pero a veces, como enfatizan el psicólogo Justin Barrett y el antropólogo Stewart Guthrie, nos excedemos. [51] Evolutivamente hablando, eso también puede ser algo bueno. Confundir un arbusto lejano iluminado por la luna con un león en reposo, no es gran cosa. Pensar que el ruido que acabamos de oír era una rama soplada por el viento cuando es un leopardo que se acerca, mortal. Cuando se asigna una agencia en la naturaleza, es mejor sobredimensionar que infradimensionar (hasta cierto punto, por supuesto), una lección que las moléculas exitosas de ADN y los vehículos de narración de historias que habitan se han tomado a pecho.

Hace décadas, durante lo que para mí fue una expedición de campamento bastante rara, fui desafiado a emprender un breve período en solitario en el bosque. Equipado con una lona, un saco de dormir, tres cerillas, una pequeña lata, un bolígrafo y un diario, me encontré más profundamente solo de lo que nunca había estado. Por cualquier medida práctica o psíquica, no estaba preparado. Conseguí un techo bajo e improvisado empalando la lona en ramas juiciosamente elegidas, pero agoté todos los fósforos en mi primer intento fallido de hacer fuego. Cuando el sol empezó a ponerse y el terror empezó a surgir, saqué el saco de dormir, me escabullí y miré la lona que se cernía sobre mi cara. Yo estaba de este lado del pánico. Para mis oídos habitados por la ciudad y mi imaginación sobrecargada, cada ráfaga y cada crujido era un oso o un puma. No me hacía ilusiones de heroísmo, pero cada segundo aparentemente interminable se sentía como mi propio rito de paso que desafiaba a la muerte. Saqué mi bolígrafo y me rasqué dos ojos circulares, una nariz manchada y una boca torcida, ligeramente levantada en las esquinas; el bolígrafo sobre la lona no es lo ideal, pero las líneas azules rotas y el plástico dentado fueron suficientes. Todavía estaba solo, pero no lo sentía tan plenamente. Si cada uno de los ruidos nocturnos del bosque estaba dotado de una mente, también lo estaba para mi grabado. Yo sería desechado por sólo tres días, pero había creado mi propio Wilson.

La evolución nos inculcó una tendencia a imaginar nuestro entorno repleto de cosas que piensan y sienten, a veces imaginándolas ofreciendo ayuda y consejo, pero más a menudo concibiéndolas como conspirando y planeando, cruzando y traicionando, atacando y vengando. Sobredimensionar los sonidos y agitaciones del mundo con mentes empeñadas en el peligro y la destrucción puede salvar tu vida. Tener la flexibilidad cognitiva para mezclar elementos de la realidad en brebajes de lo fantástico puede sembrar la innovación. Potenciar a los protagonistas ordinarios con sorprendentes cualidades sobrenaturales atrae

la atención y facilita la transmisión cultural. En combinación, estos elementos iluminan los tipos de historias que cautivaron la imaginación de nuestros antepasados y proporcionaron una guía narrativa para navegar por el mundo antiguo.

Con el tiempo, el más duradero de estos cuentos míticos sembraría una de las fuerzas más transformadoras del mundo: la religión.

7

CEREBROS Y CREENCIAS

De la imaginación a lo sagrado

Imagina que cuando finalmente hagamos contacto con seres inteligentes más allá de la tierra, ellos también contarán una historia repleta de intentos de encontrar un significado. La vida capaz de construir telescopios, de formar naves espaciales, de llegar al cosmos y escuchar su parloteo es la vida que tiene la capacidad de autorreflexión. A medida que la inteligencia madura, el mismo impulso de explorar y comprender se manifiesta como un impulso de infundir la experiencia con significado. Responde suficientemente a las preguntas de cómo y por qué las preguntas siguen rápidamente. Aquí en la Tierra, la supervivencia obligó a nuestros primeros hermanos a ser técnicos. Necesitaban aprender a modelar la piedra, el bronce y el hierro. Necesitaban dominar las técnicas de la caza, la recolección y la agricultura. Pero mientras servían a las necesidades esenciales de supervivencia, nuestros antepasados lucharon con las mismas preguntas que nosotros - preguntas de origen, significado y propósito. Sobrevivir es encender la búsqueda de por qué es importante la supervivencia. Los técnicos inevitablemente se convierten en filósofos. O científicos. O teólogos. O escritores. O compositores. O músicos. O artistas. O poetas. O devotos de miles de variaciones y combinaciones de sistemas de pensamiento y expresión creativa que prometen la comprensión de las mismas preguntas que roen nuestras entrañas mucho después de que nuestros estómagos estén llenos.

Como nuestras historias y mitos perdurables dejan en claro, la más persistente de esas preguntas es existencial. ¿Cómo comenzó el mundo? ¿Cómo terminará? ¿Cómo podemos estar aquí en un momento y desaparecer al siguiente? ¿A dónde vamos? ¿Qué otros mundos podrían estar ahí fuera?

Imaginando otros mundos

Hace unos cien mil años, en algún lugar de la región de la Baja Galilea del actual Israel, un niño de cuatro, tal vez cinco años, que tal vez jugaba tranquilamente, tal vez hacía

travesuras, sufrió un golpe traumático en la cabeza. Se desconoce el sexo de la niña, pero imaginemos que es una niña pequeña. La causa de la lesión también es oscura. Tropezar por una empinada colina rocosa, caer de un árbol, recibir un castigo excesivo... Lo que sí sabemos es que el impacto le cortó la parte delantera derecha del cráneo, causándole un daño cerebral, que soportó hasta los doce o trece años, cuando murió. Estos hechos se han deducido de los restos óseos encontrados en Qafzeh, uno de los cementerios más antiguos, cuya excavación comenzó en la década de 1930. Aunque los restos de otros veintiséis también fueron encontrados en el sitio, el entierro de la joven es distintivo. Se colocaron astas de dos ciervos sobre el pecho de la niña con un extremo que descansaba en la palma de su mano, un arreglo que según los investigadores proporciona evidencia de un entierro ceremonial. ¿Podría ser la cornamenta un adorno involuntario? Posiblemente. Pero es fácil seguir el juicio del equipo de investigación y prever que Qafzeh 11, como se conoce a la niña, sea enterrada en un ritual realizado hace cien mil años por los primeros humanos que reflexionaban sobre la muerte, luchando por comprender lo que significa y, tal vez, pensando en lo que podría seguir.[1]

Aunque las conclusiones sobre eventos tan distantes seguramente lo son, las excavaciones de entierros de épocas posteriores hacen la interpretación aún más plausible. En 1955, en la aldea de Dobrogo, a unos doscientos kilómetros al noreste de Moscú, Alexander Nacharov estaba operando una excavadora para la Fábrica de Cerámica de Vladimir cuando notó que entremezclados con la marga marrón amarillenta que había recogido había huesos. Resultaron ser los primeros de muchos que se desenterrarían en las próximas décadas en Sunghir, uno de los lugares de enterramiento más célebres del Paleolítico. Una tumba es particularmente impresionante: un niño y una niña, de aproximadamente diez y doce años al morir, fueron enterrados cara a cara en lo que parece ser una eterna fusión de dos mentes jóvenes. Interrumpidos hace más de treinta mil años, sus restos están adornados por una de las colecciones más elaboradas de bienes funerarios jamás descubiertos. Los sombreros hechos con dientes de zorro ártico decorados, brazaletes de marfil, más de una docena de lanzas de marfil, discos de marfil perforados y, para los fanáticos de la libertad, más de 10.000 cuentas de marfil tallado que probablemente fueron cosidas a las ropas de los niños. Los investigadores han estimado que a un ritmo furioso de cien horas por semana, un artesano podría haber tardado más de un año en hacer estos adornos. [2] La inversión proporciona como mínimo una fuerte insinuación de que los entierros rituales eran parte de una estrategia para trascender la finalidad de la muerte. El cuerpo podría cesar, pero alguna cualidad vital, que podría ser realzada o apaciguada u honrada o gratificada por elaborados accesorios de entierro, continuaría.

El antropólogo del siglo XIX Edward Burnett Tylor argumentó que los sueños fueron una influencia persuasiva que guió a los primeros humanos a esta misma conclusión. [3] Podemos imaginar que las escapadas nocturnas, desde el curioso hasta el ultratumba, habrían proporcionado una persistente sugerencia de un mundo más allá de lo que está disponible para abrir los ojos. Ya sea que nos sintamos reconfortados o asustados, despertar de una visita a un amigo o pariente fallecido es dejarnos con la sensación de que todavía existen. No de la forma en que lo hicieron una vez. No aquí, claramente. Pero de alguna manera etérea están cerca. Los relatos escritos, aunque no están disponibles hasta mucho más tarde,

apoyan la especulación a través de abundantes ejemplos de sueños que proporcionan ventanas a realidades no vistas. Los antiguos sumerios y egipcios interpretaban los sueños como directrices de lo divino; a lo largo del Antiguo y Nuevo Testamento, la voluntad divina se revela frecuentemente a través de los sueños. Y en la era moderna, los estudios de sociedades de caza aisladas como los aborígenes australianos revelan el papel esencial del Tiempo del Sueño, un reino eterno del que se origina toda la vida y al que toda la vida volverá. Los estados de trance oníricos también son comunes a varias tradiciones que realizan rituales impulsados por la música de percusión y la danza extenuante, que pueden durar horas e inducir ensueños hipnóticos que los participantes han descrito como transportados a distintos planos de la realidad.[4]

Durante las horas de vigilia, también, no habrían faltado episodios que sugiriesen una realidad más allá de lo visible: fuerzas poderosas que actúan en la tierra y en los cielos; acontecimientos caprichosos de la existencia diaria; frecuentes peligros que amenazan la vida y que la ponen en peligro. El éxito evolutivo en un entorno social preparó nuestro cerebro para atribuir las experiencias comunes a las acciones de los seres humanos. Cuando caía un rayo o llegaban las inundaciones o la tierra temblaba, seguíamos imaginando que un ser pensante era el responsable. Frente a todo esto, podemos imaginar que nuestros antepasados reconocieron implícitamente los límites de su influencia en un mundo incierto y en respuesta conjuraron personajes que habitaban un reino invisible que ejercerían los mismos poderes de los que carecían.

Sin querer o no, fue una respuesta espectacularmente inteligente. Nos permitió escribir eventos aleatorios en historias coherentes: Imaginar reinos no vistos poblados con personajes conocidos y fabricados. Proporcionar nombres y rostros, reales y fantásticos, que vigilan lo que hacemos y ejercen el control final sobre nuestro destino. Reflejar la mortalidad como una puerta atravesada por Qafzeh 11, sus dos docenas de compañeros de cueva, así como generaciones de antepasados, en el camino hacia estos mundos invisibles pero ascendentes. Para contar y volver a contar sus historias, y con estas narraciones invocar las personalidades, debilidades, rencores, celos, y todo tipo de comportamiento humano que se desarrolla en los mundos cercanos para explicar los acontecimientos, de otro modo inexplicados, en el nuestro.

Nuestras antiguas incursiones artísticas proporcionan más indicios de una preocupación de otro mundo. En las paredes de roca, los exploradores de todo el mundo han encontrado decenas de miles de imágenes pintadas, algunas de las cuales datan de hace más de 40.000 años. Revelan una colección de animales salvajes desde un león a un rinoceronte, hasta híbridos creativos que incluyen un ciervo con una mujer y un pájaro con un hombre. La forma humana toma un papel secundario, a menudo ejecutado como un boceto rudimentario si es que aparece. Abundan las colecciones de huellas de manos humanas, representadas como caóticas superposiciones de esbozos, cuyo significado sólo podemos adivinar: esforzarse por tocar otro reino, anhelar adquirir la aparentemente infinita durabilidad de la roca, imprimir una exuberante ornamentación, dejar las primeras versiones de "Kilroy estuvo aquí"... Las intenciones se desvanecen y entonces nos quedamos con la duda. Al igual que nosotros, reconocemos en el hechicero danzante y el bisonte moribundo los primeros esfuerzos de una fuerza creativa que parece ser la nuestra.

Mirando justo debajo de la superficie de la roca, nos vemos a nosotros mismos mirando hacia atrás.

Ahí está la emoción y el peligro. El encanto de encontrar a nuestros antiguos parientes culturales puede llevarnos a atribuir un significado indebido a sus trabajos creativos. Tal vez el arte rupestre no es más que garabatos sin sentido de la mente consciente temprana. O, en una descripción más elevada, tal vez el arte rupestre demuestra un antiguo impulso estético, lo que algunos han llamado "arte por el arte". [5] Infundir la inspiración de aquellos que vivieron hace cientos de siglos es un negocio arriesgado, y por eso es bueno que no nos excedamos. Pero si consideramos la dura prueba que se requiere para llegar al menos a algunos de estos sitios, el arqueólogo David Lewis-Williams describe cómo los exploradores de hoy y, presumiblemente, los artistas rupestres de entonces "se agacharon y se arrastraron bajo tierra a lo largo de un estrecho y absolutamente oscuro pasaje durante más de un kilómetro, se deslizaron por bancos de barro y vadearon a través de oscuros lagos y ríos ocultos" [6]- una explicación del arte por el arte parece menos plausible. Incluso aquellos de nuestros antiguos hermanos con un compromiso bohemio especialmente fuerte probablemente habrían elegido formas más fáciles de satisfacer un impulso puramente artístico.

Tal vez, entonces, nuestros antepasados artísticos emprendieron ceremonias mágicas para asegurar el éxito de la caza, una idea promovida a principios de 1900 por el arqueólogo Salomon Reinach. [7]¿Qué es un poco de espeleología y pintura si puede asegurar una deliciosa y necesaria cena? [8] O, como sugirió Lewis-Williams, desarrollando ideas anteriores discutidas por el historiador de la religión Mircea Eliade, tal vez el arte rupestre se deriva de los viajes de cabeza de los chamanes. A medida que las narraciones míticas fueron adquiriendo más seguidores, los chamanes -líderes espirituales que ganaron prominencia convenciendo a otros, y quizás a ellos mismos también, de su capacidad para viajar a los reinos invisibles de las realidades cercanas- se convirtieron en intermediarios entre este mundo y el siguiente. La inspiración de las pinturas paleolíticas puede haber sido entonces las visiones de trance experimentadas por los chamanes que negociaban con personajes mitológicos o canalizaban animales imaginarios.

Las sorprendentes similitudes entre las composiciones separadas por continentes y milenios parecen apuntar a una única y amplia explicación para el arte rupestre. Pero aunque es una visión demasiado ambiciosa, hay una característica de la que el arqueólogo Benjamin Smith está completamente convencido: "Las cuevas estaban lejos de ser sólo 'lienzos'. Eran lugares en los que se realizaban rituales, donde la gente se comunicaba con espíritus y antepasados que habitaban en otro reino, eran lugares cargados de significado y resonancia". [9]Según Smith y muchos investigadores de ideas afines, nuestros antepasados creían profundamente que a través del arte y el ritual podían influir en las fuerzas espirituales. A pesar de esa conclusión confiada, cuando miramos hacia atrás veinticinco, cincuenta, quizás incluso cien mil años, los detalles son confusos, por lo que es poco probable que alguna vez sepamos definitivamente lo que motivó a nuestros antiguos hermanos. Aún así, una imagen consistente aunque tentativa entra en escena. Vemos a nuestros antepasados participando en entierros ceremoniales, envíos rituales a otros mundos; creando arte que imagina realidades más allá de la experiencia; contando

narraciones míticas que invocan espíritus poderosos, la inmortalidad y la vida después de la muerte; en resumen, las hebras de lo que las generaciones posteriores etiquetarían como religión se están juntando, y no tenemos que esforzarnos para ver el reconocimiento de la impermanencia de la vida entrelazada en el trenzado.

Raíces evolutivas de la religión

¿Podemos utilizar la antigua y floreciente religiosidad para explicar la amplia adopción de la práctica religiosa en todo el mundo? Los defensores de la ciencia cognitiva de la religión como Pascal Boyer argumentan que podemos. Incluso a través del más amplio espectro de compromiso religioso, sugiere, hay una base evolutiva uniformemente aplicable:

> La explicación de las creencias y comportamientos religiosos se encuentra en la forma en que funcionan todas las mentes humanas. Realmente me refiero a todas las mentes humanas, no sólo a las mentes de las personas religiosas... porque lo que importa aquí son las propiedades de las mentes que se encuentran en todos los miembros de nuestra especie con cerebros normales.[10]

La tesis es que las características inherentes a los cerebros humanos, formados durante eones por la incesante batalla por la supremacía evolutiva, nos priman por convicción religiosa. No es que haya genes de dios o dendritas devocionales. En su lugar, Boyer se basa en una comprensión del cerebro desarrollada en las últimas décadas por científicos cognitivos y psicólogos evolutivos que refina la conocida metáfora de la mente como ordenador. En lugar de comparar el cerebro con un ordenador de propósito general que espera cualquier programación que adquiera a través de la experiencia, el cerebro se compara con un ordenador de propósito especial, con programación diseñada por selección natural para reforzar la supervivencia y las perspectivas de reproducción de nuestros antepasados. [11] Estos programas apoyan lo que Boyer se refiere como "sistemas de inferencia", procesos neuronales dedicados que son adeptos a responder a los tipos de desafíos -desde lanzar lanzas a cortejar a los compañeros hasta establecer alianzas- que habrían determinado qué genes migraron con éxito a la siguiente ronda y cuáles no. El punto central de Boyer es que estos sistemas de inferencia son fácilmente cooptados por las mismas cualidades intrínsecas de la religión.

Ya hemos encontrado un sistema de inferencia de este tipo: nuestra teoría de la mente, por la cual imputamos el tipo de agencia que cada uno experimenta internamente a entidades que encontramos en el mundo exterior. La tendencia adaptable y beneficiosa de sobredimensionar tal agencia aclara por qué imaginamos tan fácilmente que nuestro entorno, ya sea bajo la tierra o en el cielo, está habitado por mentes atentas. Otros sistemas de inferencia incluyen nuestra comprensión intuitiva de la psicología y la física: sin instrucción formal, todos tenemos una comprensión básica de las capacidades de las mentes y los cuerpos. Si a estos sistemas de inferencia se une nuestra atracción por conceptos mínimamente contrarios a la intuición (recordemos que se trata de conceptos que violan un pequeño número de nuestras expectativas intuitivas), no hay mucho misterio en por qué nos

aferramos a nociones como espíritus y dioses (agentes dotados de mentes similares a las humanas, pero que difieren de las expectativas en su corporeidad y sus poderes, tanto psicológicos como físicos). Los cerebros normales también tienen sistemas de inferencia social que, por ejemplo, llevan la cuenta de las relaciones, asegurando que el portador reciba una justa sacudida. Si hago algo por ti, tú tendrás que hacer algo por mí, y no te equivoques, yo llevo la cuenta. Esta variedad recíproca de altruismo puede ser la fuente de la naturaleza transaccional de la relación que los adherentes tienen típicamente con los seres sobrenaturales que pueblan las tradiciones religiosas: Me sacrificaré, rezaré, haré el bien, pero en el combate de mañana, me cubrirán las espaldas. Por otro lado, cuando pasan cosas malas, estamos demasiado preparados para atribuirlo a nuestro fracaso individual o colectivo para cumplir con las expectativas divinas.

En su libro "*Religion Explained*", Boyer desarrolla plenamente estas ideas; otros investigadores han desarrollado variaciones sobre temas similares. [12] Pero mi bosquejo transmite lo esencial del enfoque: la evolución del cerebro fue moldeada por la batalla por la supervivencia, y el cerebro victorioso que surgió tiene cualidades que abrazan la religión con los brazos abiertos. Es un ejemplo de lo que antes me referí como un paquete evolutivo. La predilección por las creencias religiosas puede no tener valor adaptativo propio, pero viene acompañada de un conjunto de otras cualidades cerebrales que *fueron seleccionadas* debido a sus funciones adaptativas. Esto no significa que todos seamos religiosos más de lo que nuestro gusto por los dulces naturalmente seleccionado significa que todos nos daremos el gusto de comer donas glaseadas. Significa que los sistemas de inferencia del cerebro son particularmente sensibles a los tipos de características que aparecen en las religiones del mundo. De hecho, tal resonancia es la razón por la que tales características han persistido en las religiones del mundo. Ya sean fantasmas o dioses, demonios o diablos, santos o almas, los conceptos religiosos son conductores virtuosos de la mente humana en evolución. Estamos atentos a ellos, actuamos sobre ellos, los promulgamos, y así se difunden ampliamente.[13]

¿Así que es eso? La supervivencia del más apto equipado nuestras mentes, y las mentes aptas son fácilmente inculcadas con una sensibilidad religiosa? ¿Qué hay del papel que imaginamos que la religión debe haber desempeñado (y que para muchos, sigue desempeñando) en la explicación de lo aparentemente inexplicable desde el origen de la vida y el universo hasta el significado de la muerte? Boyer y muchos otros que avanzan perspectivas similares no niegan el papel de la religión en el tratamiento de estas cuestiones, pero sostienen que tales consideraciones son insuficientes para explicar por qué la religión surgió y por qué tiene las características que tiene. El elefante en la sala religiosa es la mente humana, y sin un enfoque primario en la naturaleza evolucionada de la mente dejamos fuera la fuerza dominante.

El caso desarrollado por Boyer y sus colegas investigadores es convincente y perspicaz. Pero como con todas las teorías en la espectacularmente compleja arena del cerebro, la mente y la cultura, las conclusiones definitivas que convencen a todas las mentes modernas, o al menos a aquellas mentes que piensan cuidadosamente sobre los temas en cuestión, son difíciles de conseguir. Además, incluso si la ciencia cognitiva de la religión logra revelar que tenemos una susceptibilidad inherente al pensamiento religioso, queda mucho espacio

para que la religión sea más que un apéndice evolutivo, más que un mero subproducto de adaptaciones cognitivas anteriores. Como han argumentado otros investigadores, la religión puede ser omnipresente porque ha aportado su propia contribución a nuestra capacidad de adaptación.

Toma uno para el equipo

A medida que el tamaño de sus clanes crecía, las tribus de cazadores-recolectores se enfrentaban a un problema crítico. ¿Cómo asegurar la cooperación y la lealtad entre las cada vez más grandes colecciones de individuos? Para los grupos de parientes, una idea que se remonta a Darwin y que fue desarrollada en décadas posteriores por varios científicos de renombre, entre ellos Ronald Fisher, J. B. S. Haldane y W. D. Hamilton, sugiere que la evolución por selección natural resuelve el problema sin necesidad de sudar. [14] Soy leal a mis hermanos, mis hijos y otros parientes cercanos porque compartimos una parte significativa de nuestros genes. Al salvar a mi hermana de un elefante de carga, estoy aumentando la probabilidad de que los segmentos genéticos idénticos al mío persistan y se transmitan a las generaciones siguientes. No es que necesite saber esto. Y durante mi valiente hazaña, seguramente no estoy calculando las abundancias relativas en la futura reserva de genes. Pero según la lógica darwiniana estándar, mi inclinación instintiva a proteger a mis parientes, e incluso a sacrificarme por grupos de mis parientes, será seleccionada naturalmente, fomentando la continuidad de tal comportamiento en la progenie que comparte un porcentaje significativo de mi perfil genético. El razonamiento es sencillo, pero plantea la pregunta: Cuando los grupos superan una colección de parientes, ¿hay una zanahoria genética que empuña el palo de la cooperación?

Si pudieras encontrar una manera de hacerme pensar o al menos actuar como si los miembros del grupo más grande fueran parte de mi familia extendida, el problema podría ser resuelto. Pero, ¿cómo se logra eso? Anteriormente, discutimos cómo la historia, al mejorar nuestra comprensión de otras mentes, puede haber facilitado la vida en común. Algunos investigadores, como el biólogo evolutivo David Sloan Wilson, desarrollando ideas defendidas cerca del cambio de siglo XX por el sociólogo Émile Durkheim, llevan este papel de adaptación mucho más lejos. [15] La religión *es* una historia, realzada por doctrinas, rituales, costumbres, símbolos, arte y normas de comportamiento. Al conferir un aura de lo sagrado a las colecciones de tales actividades y al establecer una lealtad emocional entre aquellos que las practican, la religión extiende el club del parentesco. La religión provee de miembros a individuos no relacionados que se sienten así parte de un grupo fuertemente unido. Aunque nuestra superposición genética es mínima, estamos preparados para trabajar juntos y protegernos unos a otros debido a nuestro apego religioso.

Esa cooperación es importante. Profundamente. Como hemos visto, los humanos prevalecieron en gran parte porque nuestra especie tiene la capacidad de reunir cerebro y músculo, de vivir y trabajar en grupo, de repartirse las responsabilidades y de satisfacer eficazmente las necesidades del colectivo. La mayor cohesión social de los miembros de un grupo religioso los habría convertido en una fuerza más formidable en el mundo ancestral,

y según esta línea de argumentación, asegurar un papel de adaptación para la afiliación religiosa.

Es una perspectiva que ha generado décadas de debate. Algunos investigadores levantan la mano cuando la cohesión del grupo se presenta como una explicación evolutiva, viéndolo como un trillado recurso para explicar comportamientos supuestamente prosociales cuyo valor adaptativo ha sido de otro modo eludido. [16] Además, el valor adaptativo de la cooperación es en sí mismo un asunto complejo: En cualquier grupo de individuos cooperativos, los miembros egoístas pueden jugar con el sistema. Aprovechándose de los camaradas afables, los individuos egoístas pueden adquirir una asignación indebida de recursos y así aumentar injustamente la probabilidad de sobrevivir y reproducirse. Al transmitir sus tendencias egoístas, su progenie tenderá a hacer lo mismo, llevando con el tiempo a la extinción a sus compañeros de confianza, junto con sus sensibilidades religiosas. Hasta aquí el golpe de adaptación de la religión.

Los partidarios de la base religiosa para la cohesión social reconocen el problema pero subrayan que es sólo la mitad de la historia. Dentro de los confines de un grupo aislado de miembros de la cooperativa, los infiltrados egoístas seguramente ganarán. Pero los grupos de interés, cazadores-recolectores en el Pleistoceno, no estaban aislados. Ellos interactuaron. Lucharon. Y según una lectura del registro arqueológico, sus batallas fueron mortales. Una colección de miembros de la cooperativa, cada uno dedicado al bienestar del grupo, tendería a salir mejor parado. Como el propio Darwin dijo, "Cuando dos tribus del hombre primitivo, que vivían en el mismo país, entraban en competición, si (en igualdad de circunstancias) la una tribu incluía un gran número de miembros valientes, comprensivos y fieles, que estaban siempre dispuestos a advertirse mutuamente del peligro, a ayudarse y defenderse, esta tribu tenía más éxito y conquistaba a la otra". [17] Además, aquellos cuyo servicio se inspiraba en la devoción a los antepasados fallecidos o a las deidades vigilantes habrían sido aún más confiables y fervientes en su compromiso con la causa. [18] Y así, para determinar qué rasgos genéticos habrían nadado ampliamente a través del fondo genético, no sólo debemos tener en cuenta la dinámica dentro del grupo, favoreciendo a los egoístas, sino también la dinámica entre grupos, favoreciendo a los cooperativos. Si asumimos que a lo largo de muchos miles de generaciones el éxito entre grupos dominó el cálculo de la supervivencia, la lealtad al grupo dominaría, y así la cohesión social de la religión triunfaría.

La victoria así imaginada sigue siendo tentativa porque depende de esa misma suposición -el dominio de las fuerzas entre grupos sobre las fuerzas dentro de los grupos- y no todo el mundo está convencido de que ofrezca un retrato exacto de la vida y la muerte a lo largo de nuestro pasado de cazadores-recolectores. Envalentonando aún más a los escépticos, una explicación para el comportamiento cooperativo puede surgir de consideraciones más realistas: las matemáticas de la teoría de los juegos. Entre los extremos del comportamiento egoísta y desinteresado, hay innumerables estrategias que un miembro individual de un grupo puede seguir. Tal vez me incline por ser desinteresado, pero si se me cruza demasiadas veces mi lado egoísta emergerá con una venganza. Tal vez una vez que hayas perdido mi confianza, nunca te daré otra oportunidad... o tal vez, hazme unas cuantas vueltas buenas y te ofreceré una oportunidad para ganártela de nuevo. Y así sucesivamente.

En un grupo grande poblado por individuos comprometidos con una gama de diferentes estrategias, ¿qué sucede? Bueno, las diferentes estrategias de cooperación confieren un valor de supervivencia diferente y así, a través de las generaciones, ellos mismos estarán sujetos a la selección darwiniana. Utilizando análisis matemáticos y simulaciones informáticas, los investigadores han enfrentado varias estrategias entre sí y han encontrado que una en particular - "Haré algo bueno para ti siempre que tú hagas algo bueno para mí a cambio, pero si haces algo solapado, rápidamente tomaré represalias" - supera de forma fiable a otras variantes, incluyendo aquellas mucho más egoístas. El análisis teórico sugiere que una cooperación cualificada de este tipo ayuda a la supervivencia. [19] Para los detractores, esto demuestra que la cooperación puede surgir orgánicamente y difundirse por selección natural, sin necesidad de que los participantes tengan una creencia religiosa común.

Tras décadas de discusión, algunos investigadores afirman ahora que estas disputas han sido finalmente resueltas. Pero como tales evaluaciones han sido emitidas por defensores de ambos lados, la evaluación del papel de la religión como el pegamento social que promueve la supervivencia del Pleistoceno sigue eludiendo el consenso. Es un problema complejo. Entre otras cualidades seductoras, el encanto de la historia, la inclinación a dotar de agencia, la comodidad del ritual, el apetito por la explicación, la seguridad de la comunidad y el atractivo cognitivo de contrarrestar las expectativas, la religión es un desarrollo humano rico e intrincado cuya génesis se remonta a una época tan remota que los datos concretos, desde la práctica antigua hasta el conflicto intragrupo, son escasos. El debate continuará sin duda alguna.

Otra posibilidad totalmente distinta es que al evaluar la función adaptativa potencial de la religión, al argumento sobre la cohesión del grupo le falta una parte esencial de la historia. Varios investigadores han sugerido que el impacto adaptativo de la religión es más directamente evidente a nivel del individuo.

Adaptación individual y religión

Durante nuestra investigación sobre el origen del lenguaje, una de las propuestas fue el papel de los chismes en el mantenimiento de las jerarquías y el fomento de las alianzas. Por frívola que pueda ser una conversación en la era moderna, el psicólogo Jesse Bering sitúa el chismorreo en el nexo del papel adaptativo de la religión en el mundo antiguo. Antes de que adquiriéramos la capacidad de hablar, un pícaro entre nosotros podría comportarse mal - robar comida, tomar prestadas las parejas sexuales, quedarse atrás durante la caza - pero si los testigos de la transgresión eran pequeños en número y débiles en estatus, el culpable podría salir impune. Una vez que el lenguaje se arraigó, eso cambió. Con una sola infracción, aunque se discutiera ampliamente, la reputación del culpable se resentiría y las oportunidades de reproducción caerían en picado. La sugerencia de Bering es que si un posible transgresor imagina que siempre hay un poderoso testigo en el viento, en los árboles o en el cielo, es menos probable que transgreda, menos probable que se alimente de chismes desfavorables y menos probable que se convierta en un paria social. En consecuencia, sería más probable que tuviera descendencia y transmitiera sus instintos

temerosos de Dios. La predisposición a la religión protege su linaje genético y así se auto-perpetúa.[20]

Las pruebas que lo respaldan provienen de los experimentos que Bering ha realizado en los que se presenta a los niños una tarea difícil y se les deja solos para llevarla a cabo. En la ausencia de supervisión, los investigadores encontraron lo que se esperaba. Muchos niños hacen trampa. Sin embargo, aquellos niños a los que se les dice que hay un testigo invisible en la habitación, una presencia amigable pero totalmente atenta, son mucho más propensos a adherirse a las reglas. Esto es válido incluso para aquellos niños que afirman que no creen realmente que haya un ser invisible en absoluto. La conclusión de Bering es que la mente joven, que él plausiblemente argumenta que proporciona una ventana más directa a nuestra naturaleza humana inherente en comparación con las mentes mayores que han estado sujetas a una mayor influencia cultural, está predispuesta a actuar de acuerdo con una presencia invisible que controla constantemente el comportamiento. En la antigüedad, era esta misma preparación la que alentaba el comportamiento prosocial que protegía las reputaciones, aumentaba las oportunidades de reproducción, y por lo tanto difundía aún más la preparación en sí misma - una preparación, es decir, para una sensibilidad religiosa.

Un papel adaptativo diferente para la religión ha sido desarrollado por psicólogos sociales experimentales que han pasado décadas fomentando la visión de Ernest Becker, cuya *Negación de la Muerte nos puso en camino en el* capítulo 1. El terror de saber que vamos a morir, estos investigadores argumentan, "habría hecho que nuestros antepasados temblaran montones de protoplasma biológico en el camino rápido al olvido". [21] Lo que puede habernos salvado, sugieren, fue la promesa de vida más allá de la muerte física, ya sea literal o simbólica. El propio Becker presentó un caso persuasivo de que abordar la conciencia de la mortalidad invocando lo sobrenatural era una maravillosa innovación humana. Para aliviar la angustia de la transitoriedad se requiere un palliador con una durabilidad no calificada e ilimitada, algo imposible de lograr en el mundo real de las cosas materiales.

Por supuesto, pueden encontrar la imagen de nuestros físicamente robustos antepasados acurrucados en la sabana en una parálisis inducida por la ansiedad difícil de comprender. Sin embargo, a través de astutos experimentos psicosociales, los investigadores han argumentado que incluso aquí, en la era moderna, estamos demostrablemente afectados, aunque sin saberlo, por la conciencia de la mortalidad. En uno de esos experimentos, se encargó a los jueces de los tribunales de Arizona que recomendaran una multa para los acusados de un delito menor. En las instrucciones escritas que se dieron a los jueces, que incluían un cuestionario estándar de perfil de personalidad, a la mitad se le hicieron un par de preguntas adicionales que requerían una reflexión sobre su propia mortalidad (por ejemplo, ¿Qué emociones despierta el pensar en su propia muerte?) Los investigadores previeron que, dado que el código jurídico forma parte del esfuerzo concertado de la sociedad por afirmar el control de una realidad por lo demás anárquica -proveyendo un baluarte contra los peligros que acechan justo más allá de los límites de la civilización-, los jueces a los que se les había recordado el peligro final, su propia muerte, harían cumplir con más vehemencia los estatutos jurídicos. Las predicciones fueron acertadas. Pero incluso los investigadores encontraron notable la disparidad de las multas recomendadas por los dos

grupos de jueces. En promedio, las multas emitidas por los jueces que determinan la mortalidad fueron *nueve* veces mayores que las del grupo de control.[22]

Como subrayan los investigadores, si la mente judicial diligentemente entrenada y empapada en el estándar de la imparcialidad desapasionada puede verse tan afectada por el brillo de un poco más de luz consciente sobre la mortalidad, deberíamos hacer una pausa antes de descartar una influencia similar pero igualmente sigilosa en el trabajo dentro de cada uno de nosotros. De hecho, cientos de estudios posteriores (que varían los sujetos, su país de origen, sus supuestas tareas, la forma en que se estimula la conciencia de la mortalidad, etc.) han demostrado que esas influencias pueden medirse y manifestarse ampliamente, desde la cabina de votación, hasta los prejuicios xenófobos, la expresión creativa y la afiliación religiosa. [23] Becker sostuvo, y estos estudios lo respaldan, que la cultura ha evolucionado en parte para mitigar los efectos potencialmente debilitantes que de otro modo acompañarían a la conciencia sobre la mortalidad. Por consiguiente, desde esta perspectiva, si se burla de tal posibilidad es porque la cultura está haciendo su trabajo.

Pascal Boyer, con quien comenzamos nuestra discusión sobre las raíces evolutivas de la religión, rechaza este papel de la religión, señalando que "un mundo religioso es a menudo tan aterrador como un mundo sin presencia sobrenatural, y muchas religiones crean no tanto una tranquilidad como una gruesa capa de melancolía". [24] Pero en lugar de sujetar un saco de huesos que traquetea, en el espíritu de los adherentes de Becker, y lejos de arrojar sombras oscuras sobre sus devotos seguidores, como preveía Boyer, una sensibilidad religiosa puede haber proporcionado un beneficio más modesto a un paciente menos desanimado. Tal vez las antiguas actividades religiosas iluminaban la muerte bajo una luz más suave y situaban la experiencia cotidiana dentro de una narración más duradera, una consecuencia beneficiosa de la experiencia religiosa que William James describió como la que proporciona "una garantía de seguridad y un temperamento de paz", al tiempo que inculca un "nuevo entusiasmo que se añade a sí mismo como un regalo a la vida, y toma la forma de un encantamiento lírico o de un llamamiento a la seriedad y el heroísmo".[25]

Claramente, todavía no hay consenso sobre por qué la religión surgió ni sobre por qué ha permanecido tan tenazmente. Y no por falta de ideas: cooptar el cerebro seleccionado naturalmente, impulsar la cohesión del grupo, calmar la ansiedad existencial, proteger las reputaciones y las oportunidades de reproducción. El registro histórico puede ser demasiado irregular para que podamos construir un caso definitivo; la religión puede desempeñar papeles demasiado variados como para someterse a explicaciones globales. Sigo siendo parcial en cuanto a la relevancia de la religión para nuestro singular reconocimiento de nuestras vidas finitas; como lo resumió Stephen Jay Gould, "Un cerebro grande nos permitió aprender... la inevitabilidad de nuestra mortalidad personal" [26] y "toda religión comenzó con la conciencia de la muerte". [27] Pero si la religión se arraigó entonces porque transformó esa conciencia en una ventaja adaptativa es una cuestión totalmente diferente.

El exquisito orden del cerebro le permite generar copiosos pensamientos y acciones, algunos directamente relacionados con la supervivencia, otros no. De hecho, es esta misma capacidad, nuestro extenso repertorio de comportamiento, que proporciona la base para la variedad de la libertad humana que discutimos en el capítulo 5. Lo que es incuestionable es

que a través de estas acciones, hemos mantenido firmemente la religión con nosotros, desarrollándola a lo largo de milenios en instituciones cuya influencia impregna el planeta.

Un esbozo de las raíces religiosas

Durante el primer milenio a.C., a través de la India, China y Judea, pensadores tenaces e inventivos reexaminaron los antiguos mitos y formas de ser, lo que implicó entre otros desarrollos lo que el filósofo Karl Jaspers describió como "los comienzos de las religiones del mundo, por las cuales los seres humanos aún viven". [28] Los estudiosos debaten el grado de relación de estos lejanos desarrollos, pero hay acuerdo sobre el resultado. Los sistemas religiosos se organizaron cada vez más a medida que los seguidores establecían historias, recogían ideas y sintetizaban directrices que, al ser canalizadas a través de profetas ungidos y transmitidas oralmente de una generación a otra, habían obtenido un sello de lo sagrado. Hay una gran variación en el contenido de los textos resultantes, por supuesto, pero tienen en común la fascinación por las mismas preguntas que guían nuestra exploración en estas páginas: ¿De dónde venimos? ¿Y a dónde vamos?

Entre los primeros registros escritos que han sobrevivido se encuentran los Vedas, compuestos en sánscrito en el subcontinente indio, con porciones que datan de tan sólo 1500 a.C. Junto con los Upanishads, un rico conjunto de comentarios escritos probablemente después del siglo VIII a.C., los Vedas son una voluminosa colección de versos, mantras y prosa que constituyen los textos sagrados de lo que se convertiría en la religión hindú, practicada actualmente por uno de cada siete habitantes de la Tierra, alrededor de 1.100 millones de personas. Antes de que yo tuviera diez años, tuve una entrada personal a estas obras.

Fue a finales de los años 60. La paz, el amor y Vietnam estaban en el aire mientras mi padre, mi hermana y yo paseábamos en un brillante día soleado por Central Park. Nos detuvimos en el Naumburg Bandshell justo al lado del Poeta's Walk, donde una gran reunión de devotos Hare Krishna estaban tocando enérgicamente los tambores, cantando y bailando. Uno de los adherentes, con los ojos saltones y las lágrimas fluyendo, estaba expresando una apasionada comunión astral pulsando al ritmo mientras miraba fijamente al sol. Sorprendentemente, al menos para mí, de repente me di cuenta de que uno de los tamborileros, vestido con una túnica fluida y con la cabeza afeitada, excepto por un solo mechón en la parte superior, era mi hermano. Pensé que estaba en la universidad. La salida, aparentemente, era la forma que tenía mi padre de introducirnos en la nueva dirección que había tomado la vida de mi hermano.

En las décadas siguientes, la comunicación con mi hermano fue episódica, pero en cada encuentro los Vedas estaban en el centro o dando vueltas en las cercanías. Es difícil decir si mis propios intereses fueron despertados por estos encuentros o si las conversaciones surgieron naturalmente de hermanos que se acercaban a preguntas similares desde perspectivas muy diferentes. Sin duda fue enriquecedor aprender de antiguas y para mí desconocidas rumores sobre los orígenes cósmicos: "No había ni inexistencia ni existencia entonces; no había ni el reino del espacio ni el cielo que está más allá. ¿Qué es lo que se ha

agitado? ¿Dónde? ¿En la protección de quién? ¿Había agua sin fondo? No había entonces ni muerte ni inmortalidad. No había ningún signo distintivo de la noche ni del día. Aquel respiraba, sin viento, por su propio impulso. Aparte de eso, no había nada más allá". [29] Me conmovió la universalidad de la necesidad humana de sentir los ritmos de la realidad. Pero para mi hermano, los Vedas eran más que eso. Proporcionaban una visión más amplia de la cosmología que yo estudiaba matemáticamente. Como poesía, las palabras capturan artísticamente el enigma de un principio a otro. Como metáfora, hablan de la naturaleza desconcertante de un tiempo antes del tiempo. Como una meditación, tal vez una inmersión comunitaria alrededor de un fuego crepitante envuelto por una impresionante pero completamente misteriosa cubierta de estrellas negras, las líneas transmiten la aparente paradoja de cómo puede haber un universo. Pero los antiguos himnos y versos, las imaginativas historias del Purusha de mil cabezas desmembrado para crear el sol, la tierra y la luna, así como las muchas otras ofrendas evocadoras y elevadas, no explican el origen del universo. Las palabras reflejan nuestra búsqueda de patrones, explicaciones, mentes atentas a la supervivencia, desarrollando una historia vívida para proporcionar un marco simbólico para vivir, cómo llegamos a ser, cómo debemos comportarnos, las consecuencias de nuestras acciones, y la naturaleza de la vida y la muerte. Lo que se hizo evidente para mí a través de estos pinceles fraternales esporádicos es que los Vedas buscan algo estable, algún tipo de cualidad constante que subyace en las arenas movedizas de la realidad familiar. Es una descripción que yo, y muchos de mis colegas, utilizaríamos con gusto para caracterizar la carga de la física fundamental. Las disciplinas comparten un impulso común de ver más allá de las apariencias disponibles en la experiencia cotidiana. Sin embargo, la naturaleza de las explicaciones que cada disciplina considera capaces de hacer avanzar esta carga son completamente distintas.

A mediados del siglo VI a.C., Siddhārtha Gautama, un príncipe nacido en el actual Nepal que se había criado estudiando los Vedas, se angustió al ver que la vida de lujo que se le había entregado se enfrentaba a la angustia que sufrían los que llevaban una existencia más común. Como cuenta la famosa historia, Gautama decidió renunciar a los privilegios y vagar por el mundo en busca de una forma de aliviar la miseria del sufrimiento humano. Las ideas resultantes, desarrolladas y promulgadas por sus seguidores en gran parte después de su muerte, constituyen el budismo, practicado ahora por uno de cada doce habitantes de la Tierra, alrededor de 500 millones de personas. A medida que se extendió el pensamiento budista, se desarrollaron numerosas sectas, pero todas comparten la creencia de que la percepción es una guía ilusoria de la realidad. Hay cualidades del mundo que pueden parecer estables pero, en realidad, todas las cosas siempre cambian. Desviándose de sus orígenes védicos, el budismo niega que haya un sustrato inmutable que subyace a la existencia y atribuye la raíz del sufrimiento humano al fracaso de reconocer la impermanencia de todo. Las enseñanzas del Buda esbozan una forma de vida que promete una visión sin adornos y más claramente percibida de la verdad y, al igual que en los Vedas, el camino hacia esa iluminación implica una serie de renacimientos, con el fin de concluir los ciclos de reencarnación alcanzando un estado eterno de felicidad que está más allá del deseo, más allá del sufrimiento y más allá del yo. Si la imaginación anterior de la humanidad de reinos donde la vida continuó más allá de esta vida fue una maniobra mental

notable para abordar el enigma de la mortalidad, las posturas hindúes y budistas son aún más notables. La muerte se reimagina como un nuevo comienzo en un proceso cíclico cuyo objetivo es una liberación última y permanente de la vida. La conclusión de los ciclos, una vez alcanzada, conduce a un dominio en el que desaparece el concepto de existencia distinta. Nuestra impermanencia se convierte en un rito sagrado de paso en el camino hacia lo intemporal.

Debido a que el hinduismo y el budismo buscan una realidad más allá de las ilusiones de la percepción cotidiana, una caracterización que también describe muchos de los avances científicos más sorprendentes de los últimos cien años, una pequeña industria ha producido artículos, libros y películas que pretenden establecer vínculos con la física moderna. Aunque se pueden encontrar similitudes en perspectiva y lenguaje, nunca he encontrado más que una resonancia metafórica entre ideas distintas vagamente interpretadas. Las descripciones de la física moderna proporcionadas en las popularizaciones, tanto las mías como las de otros, normalmente suprimen las matemáticas en favor de cuentas más accesibles, pero, inequívocamente, las matemáticas son el ancla de la ciencia. Las palabras, por muy cuidadosamente elegidas y elaboradas, son sólo una traducción de las ecuaciones. Invocar tales traducciones como base para el contacto con otras disciplinas casi nunca se elevará por encima del nivel de una alianza poética.

Este juicio está en consonancia con al menos algunas de las voces líderes de las disciplinas espirituales. Hace algunos años fui invitado a participar en un foro público con el Dalai Lama. Durante la discusión, noté la preponderancia de libros que explican cómo la física moderna está recapitulando descubrimientos hechos en el Lejano Oriente hace miles de años, y le pregunté al Dalai Lama si consideraba válidas estas afirmaciones. Su respuesta directa me dejó una impresión significativa: "Cuando se trata de la conciencia, el budismo tiene algo importante que decir. Pero cuando se trata de la realidad material, tenemos que mirar a usted y a sus colegas. Ustedes son los que penetran profundamente". [30] Recuerdo haber pensado: "Qué maravilloso es imaginar a los líderes religiosos y espirituales de todo el mundo siguiendo su simple, intrépido y honesto ejemplo".

Durante aproximadamente la misma época en que el Buda vagaba por la India, el pueblo judío del Reino de Judá fue derrotado por los babilonios y forzado al exilio. En un esfuerzo por codificar su identidad, los líderes judíos reunieron relatos escritos dispares y supervisaron la transcripción de las historias orales, lo que dio lugar a las primeras versiones de la Biblia hebrea, un documento que seguiría evolucionando y se convertiría en un texto sagrado de las religiones abrahámicas, que ahora practican más de uno de cada dos habitantes de la Tierra, unos cuatro mil millones de personas. [31] El Dios del judaísmo, el cristianismo y el islam es el todopoderoso, omnisciente, omnipresente y singular creador de todo, una concepción que, para muchos en todo el mundo, es la imagen dominante que evocan cuando se habla, secular o sagrada, de religión.

El Antiguo Testamento cuenta su propia historia de origen ampliamente conocida. Bueno, cuenta dos de esas historias. La primera dura seis días, comienza con la formación de los cielos y la tierra y concluye con la creación del hombre y la mujer; la segunda llena un solo día, con el hombre creado desde el principio; durante su primera siesta, la mujer entra en escena. Generación tras generación se suceden rápidamente, pero el Antiguo

Testamento es menos que comunica dónde van los protagonistas cuando mueren. Salvo un par de breves referencias a la resurrección, no hay compromiso con la vida después de la muerte. Los místicos e intérpretes judíos desarrollaron posteriormente numerosas ideas que involucraban a almas inmortales que esperaban otro mundo, pero no hay una sola interpretación que concilie la miríada de fuentes y comentarios. Medio milenio más tarde, esa incertidumbre se desvanecería a medida que el cristianismo desarrollara una doctrina teológica impregnada de almas eternas que mantienen sus identidades mucho más allá de su tiempo en la tierra. Medio milenio después, el Islam introduciría su propio y extenso cuerpo de creencias sobre temas similares, alineándose con el cristianismo en su reverencia por la proximidad del día del juicio, cuando los muertos resucitaran y los considerados dignos recibieran la recompensa celestial eterna mientras que todos los demás soportaran la condenación eterna.

El puñado de religiones que hemos estudiado brevemente son seguidas colectivamente por más de tres de cada cuatro habitantes del planeta Tierra. Con miles de millones de adherentes, la naturaleza y el estilo del compromiso religioso varía considerablemente y, si incluimos las más de cuatro mil religiones más pequeñas que se practican actualmente en todo el mundo, la gama de compromisos y los detalles del contenido doctrinal se amplían aún más. Aun así, hay cualidades comunes, como las figuras exaltadas que han visto más allá o se les ha concedido acceso a historias que pretenden explicar cómo comenzó todo, cómo terminará todo, adónde iremos todos y cuál es la mejor manera de llegar allí. Aún más profunda es la expectativa prevaleciente de que los seguidores asuman una mentalidad sagrada. El mundo está lleno de historias que pueden informar sobre cómo vivimos. El mundo está lleno de pronunciamientos que pueden guiar la forma en que nos comportamos. Esas historias y pronunciamientos que están ligados a una doctrina religiosa se elevan por encima de todos los demás porque en la mente de los fieles suscitan alguna variedad de creencias.

El impulso de creer

Hace algunos años, mientras estaba en los últimos días caóticos de un proyecto que consumía todo, llegó una invitación para dar un discurso de apertura en una reunión en el Estado de Washington. Distraído, acepté la invitación sin asegurarme de que la organización había sido debidamente investigada. Unos meses más tarde, cuando la charla se extendió, me di cuenta de que estaba programado para hablar en la Escuela de la Iluminación de Ramtha, una organización dirigida por Judy Zebra Knight, que afirma canalizar a una guerrera de treinta y cinco mil años de edad, Ramtha, procedente de la tierra perdida de Lemuria (que, al parecer, estaba frecuentemente en guerra con la tierra perdida de la Atlántida). Una rápida búsqueda dio como resultado reveladores videos, incluyendo uno de un viejo episodio de *The Merv Griffin Show* en el que el Caballero echa la cabeza hacia atrás, la adelanta, entra en trance, deja caer la voz, adopta una forma de hablar a medio camino entre Yoda y la Reina, y, nos quiere hacer creer, encarna al sabio lemuriano. Mi pequeña hija, mirando sobre mi hombro, trató de no reírse. Falló. Yo también me habría reído si no estuviera mortificado por haber aceptado la invitación. Pero fue el día anterior a la presentación, demasiado tarde para echarse atrás con gracia.

Al llegar, mi primer encuentro fue con cientos de personas con los ojos vendados y los brazos extendidos, todos fresando sobre un gran recinto de hierba. Mi guía me explicó que pegada a cada uno había una tarjeta en la que habían escrito el sueño de su vida, y el ejercicio era "sentir" el camino hacia una tarjeta idéntica que había sido plantada en algún lugar del campo. Señaló que el éxito es un paso clave para asegurar que el sueño se realice. "¿Cómo va eso?" Pregunté. "Oh, maravillosamente. Ya en esta sesión una participante encontró su tarjeta idéntica". Los siguientes fueron los arqueros con los ojos vendados. Mantuve una distancia saludable y me recriminé a los ruegos de participar, más aún cuando noté que un fotógrafo se había unido silenciosamente al tour. Los arqueros con los ojos vendados tuvieron tanto éxito como los buscadores con los ojos vendados. Finalmente, se me unió una joven, probablemente de unos veinte o treinta años, cuyo talento telepático le permitía nombrar sucesivas cartas en una baraja barajada. "Siete de diamantes", predijo. "Maldición, seis de tréboles. Pero sólo me faltó uno. Nueve de picas. Oh, es un tres de diamantes. Ajá, *ahí está* ese diamante". Y así fue. Me dijo que practica muchas horas cada día y sabe que necesita entrenar más duro.

A los que se habían reunido, y más tarde en el discurso de apertura, no pude evitar ofrecer algunas observaciones básicas, muchas de las cuales hemos tocado en estas páginas. Expliqué que somos una especie que mira al mundo y ve patrones. Y en su mayor parte eso es algo bueno. A lo largo de muchas generaciones, la selección natural nos equipó para identificar patrones en la forma en que las personas y los objetos aparecen y se mueven, permitiéndonos identificarlos rápidamente con sólo unas pocas pistas visuales. Detectamos patrones en el comportamiento animal, permitiéndonos anticipar cuándo es seguro acercarse y cuándo es mejor dirigirse en otra dirección. Comprendemos los patrones de cómo vuelan los objetos, desde rocas hasta lanzas, cuando son lanzados, una habilidad que fue particularmente útil para nuestros antepasados que buscaban dominar la siguiente comida. A través de los patrones desarrollamos los medios para comunicarnos y así unirnos en grupos - tribus a naciones - que ejercen las influencias más poderosas del mundo. En resumen, la capacidad de reconocer los patrones es la forma en que sobrevivimos. Pero, continué, a veces nos pasamos de la raya. A veces, nuestros detectores de patrones seleccionados naturalmente están tan preparados, tan listos para anunciar que se ha encontrado una señal, que ven patrones y prevén correlaciones que no están ahí. A veces asignamos un significado a lo que no tiene sentido. A partir de la matemática básica sabemos que, en promedio, una de cada cuatro veces adivinará correctamente el palo de una carta; una de cada trece veces, adivinará su rango. Pero ese patrón no revela nada sobre la habilidad telepática. Una vez en la luna azul -bueno, menos a menudo que eso- caminarás al azar por el campo y encontrarás tu carta correspondiente, pero eso no dice nada sobre la realización de los sueños. ¿Con qué frecuencia, pregunté, se da cuenta de que una notable coincidencia *no ocurrió*?

Los asistentes, que ya estaban todos metidos en un granero cavernoso, aplaudieron su aprobación. Muchos se pusieron de pie para ovacionarlos, lo cual, como dije a todos los reunidos, fue apreciado pero confuso. Les digo que su enfoque para encontrar una realidad más profunda y los métodos que están practicando no llevan a ninguna parte. Otra ovación.

Más tarde, en la firma de libros, varios participantes, hablando sotto voce, ofrecieron aclaraciones. "Muchos de nosotros no creemos en muchas de las cosas que pasan aquí y es importante que alguien lo diga. Pero hay *algo* más ahí fuera, podemos sentirlo, y venimos a la escuela porque necesitamos estar cerca de otros que tienen el mismo impulso de buscar una verdad más profunda". Puedo relacionarme. Entiendo el impulso. La historia de la física es una colección de episodios en los que una y otra vez heroicas exploraciones matemáticas y experimentales han revelado que *hay* algo más ahí fuera, a menudo algo extraño y maravilloso que requiere que reelaboremos nuestra imagen de la realidad. Hay muchas razones para creer que nuestra comprensión actual, incluso con su capacidad de explicar los abundantes datos con una precisión asombrosa, es provisional, y por eso nosotros los físicos anticipamos que de aquí en adelante, este ritmo de revisión se repetirá muchas veces. Sin embargo, es a través de siglos de esfuerzo que hemos refinado nuestras herramientas de investigación, y estos son los métodos matemáticos y experimentales que constituyen el cuerpo riguroso de la práctica científica. Estos son los métodos que transmitimos a nuestros estudiantes y compañeros de investigación. Estos son los métodos que han demostrado su capacidad para acceder de forma fiable a las cualidades ocultas de la realidad.

Estoy abierto a reclamaciones no convencionales. Si los datos recogidos en experimentos cuidadosamente diseñados y replicables que investigan, por ejemplo, la capacidad de sentir las cartas ocultas en una baraja, revelaran mejor que el éxito aleatorio, o si los datos robustos establecieran que un miembro de nuestra especie fue capaz de canalizar un antiguo sabio procedente de una tierra perdida hace mucho tiempo, me interesaría. Extraordinariamente interesado. Pero en ausencia de tales datos, y en ausencia de cualquier razón para anticipar que tales datos podrían estar disponibles, y en ausencia de cualquier argumento en cuanto a por qué tales afirmaciones no están en total contradicción con todo lo que demostrablemente sabemos sobre el funcionamiento de la realidad, rápidamente llega un punto en el que debemos concluir que no hay base para sostener una creencia en tales afirmaciones.

Lo que plantea la pregunta: ¿Hay alguna base para creer en un ser invisible y todopoderoso que creó el universo, que escucha y responde a nuestras oraciones, que lleva la cuenta de lo que decimos y hacemos, y que reparte recompensas y castigos? Al desarrollar una respuesta, vale la pena desarrollar el concepto de la creencia más plenamente.

Creencia, confianza y valor

Casi para una persona, aquellos que preguntan sobre mi creencia en Dios invocan la "creencia" de la misma manera que lo harían si preguntaran sobre mi creencia en la mecánica cuántica. De hecho, a menudo me hacen las dos preguntas en conjunto. Tiendo a expresar mi respuesta en términos de confianza -una medida de certeza- señalando que mi confianza en la mecánica cuántica es alta, porque la teoría predice con precisión las características del mundo, como el momento del dipolo magnético del electrón, con una precisión superior al noveno decimal, mientras que mi confianza en la existencia de Dios es

baja debido a la escasez de datos de apoyo rigurosos. La confianza, como ilustran estos ejemplos, surge de un juicio desapasionado y esencialmente algorítmico de las pruebas.

De hecho, cuando los físicos analizan los datos y anuncian un resultado, cuantifican su confianza utilizando procedimientos matemáticos bien establecidos. La palabra "descubrimiento" se utiliza generalmente sólo cuando la confianza cruza un umbral matemático: la probabilidad de ser engañado por una casualidad estadística en los datos debe ser inferior a aproximadamente uno en 3,5 millones (un número de aspecto arbitrario pero que surge naturalmente en los análisis estadísticos). Por supuesto, incluso niveles tan altos de confianza no aseguran que un "descubrimiento" sea cierto. Los datos de experimentos posteriores pueden requerir que ajustemos nuestra confianza; también en este caso, las matemáticas proporcionan un algoritmo para calcular la actualización.

Mientras que pocos de nosotros vivimos con tales métodos matemáticos, llegamos a muchas de nuestras creencias a través de un razonamiento similar aunque menos abiertamente analítico. Vemos a Jack con Jill, y nos preguntamos si podrían ser una pareja; los vemos juntos una y otra vez, y nuestra confianza en esa conclusión crece. Más tarde, nos enteramos de que Jack y Jill son hermanos, y así descartamos nuestra evaluación anterior. Y así sigue. Es un proceso iterativo que puede anticiparse a la convergencia de creencias que reflejan la verdadera naturaleza del mundo. Pero no tiene por qué ser así. La evolución no configuró nuestros procesos cerebrales para formar creencias que se alineen con la realidad. Los configuró para favorecer las creencias que generan comportamientos que promueven la supervivencia. Y las dos consideraciones no tienen por qué coincidir. Si nuestros antepasados hubieran investigado cuidadosamente cada movimiento y crujido que les llamara la atención, habrían encontrado que la mayoría podría explicarse sin invocar un agente volitivo. Pero desde el punto de vista de la adaptabilidad, su onerosa inversión en la búsqueda de la verdad no habría tenido mucho éxito. A través de decenas de miles de generaciones, nuestros cerebros evitaron una mayor precisión para una comprensión más aproximada. Las respuestas ágiles a menudo superan a las evaluaciones consideradas. La verdad es un personaje importante en el drama de la creencia, pero es fácilmente superada por la supervivencia y la reproducción.

Para engrosar aún más la trama, la evolución añadió otro miembro del elenco: las emociones. En 1872, más de una docena de años después de anunciar la evolución por selección natural, Darwin publicó *La expresión de las emociones en el hombre y los animales,* explorando su convicción de que el cerebro biológicamente adaptado, y no la cultura, es el principal impulsor de la expresión emocional. Basándose en observaciones cercanas de sus hijos, cuestionarios ampliamente difundidos y datos interculturales que reunió durante sus largas expediciones, Darwin planteó que, por ejemplo, la tendencia a sonreír cuando se está satisfecho o a sonrojarse cuando se está avergonzado era universal. Se podía contar con esas mismas respuestas claras en todas las culturas del mundo. En el siglo y medio transcurrido desde entonces, los investigadores han tomado el liderazgo de Darwin y han buscado los papeles de adaptación que podrían explicar las diversas emociones humanas, así como investigado los sistemas neuronales que podrían ser responsables de generarlas. El miedo, la investigación ha demostrado, es de hecho

primitivo - desde el principio, hubo un valor adaptativo significativo en el comportamiento rápido y las respuestas fisiológicas al peligro. El amor de los padres, que impulsa el cuidado esencial de la progenie indefensa, es probablemente una antigua adaptación también. La vergüenza, la culpa y la vergüenza, que son particularmente relevantes para un comportamiento conducente dentro de grupos más grandes, son adaptaciones que probablemente vinieron más tarde a medida que el tamaño de los grupos crecía. [32] La relevancia para nosotros aquí es que así como la presión adaptativa dio forma al lenguaje, la posesión, la narración, la creación de mitos, la práctica de rituales, la creación de arte y la ciencia que persigue la mente humana, la presión adaptativa también dio forma a nuestras ricas capacidades emocionales. La emoción ha estado enredada a lo largo de nuestro desarrollo evolutivo. Así, las creencias han surgido de un complejo cálculo que sintetiza análisis razonados y respuestas emocionales dentro de una mente que adquiere un talento para la supervivencia.[33]

El cálculo de nuestras creencias depende también de una serie de factores, como las influencias sociales, las fuerzas políticas y la conveniencia bruta. Al principio de la vida, la creencia está fuertemente influenciada por la autoridad paterna. ¿Mamá o papá dicen que es verdad? Entonces es verdad. Como Richard Dawkins ha notado, la selección natural favorece a los padres que pasan a sus hijos información que mejora la supervivencia, y así creer que lo que dice mamá o papá tiene sentido evolutivo. Más tarde, muchos inician su propio cálculo de creencias -investigando, discutiendo, leyendo y desafiando-, uno que en sí mismo está frecuentemente sesgado por las expectativas preexistentes y la exposición a las creencias de otros. La mayoría de nosotros también ampliamos la lista de autoridades consideradas dignas de confianza: maestros, líderes, amigos, funcionarios y otros expertos ungidos. Tenemos que hacerlo. Nadie puede redescubrir, o incluso verificar, miles de años de conocimiento acumulado. Una vez tuve un sueño, una pesadilla en realidad, en el que estaba de vuelta en la defensa de mi tesis doctoral, y el examinador, riéndose en voz baja, me dijo que todos los experimentos y todas las observaciones que apoyaban las "leyes" de la mecánica cuántica de la física habían sido inventadas. Fui el más afectado por una elaborada broma práctica, habiendo sido engañado por un panteón de autoridades que respetaba y una comunidad de compañeros en los que confiaba. Por improbable que sea el escenario del sueño, el hecho es que he verificado personalmente los resultados de sólo una pequeña fracción de los experimentos esenciales de la disciplina. Se podría decir que he tomado la mayoría de los resultados con fe.

Mi confianza se deriva de décadas de experiencia de primera mano, siendo testigo de cómo los físicos minimizan la subjetividad humana al centrarse en los datos cuidadosamente acumulados, cuestionando implacablemente las hipótesis y descartando todas las que no cumplan con un riguroso conjunto de normas universales. Pero incluso con una atención tan diligente, la contingencia histórica y los prejuicios humanos impulsados por las emociones encuentran formas de filtrarse. Uno de los enfoques dominantes de la mecánica cuántica (llamado la *interpretación de Copenhague*) puede ser rastreado en parte a las poderosas personalidades que dominaron durante el inicio de la teoría. Le remitiré a uno de mis otros libros, *La realidad oculta,* para una discusión, pero sospecho que si la mecánica cuántica hubiera sido desarrollada por un elenco diferente de personajes, la

ciencia formal existiría de todos modos, pero esta perspectiva interpretativa particular no habría disfrutado de la misma posición dominante a lo largo de tantas décadas. La belleza de la ciencia es que a través de la investigación continua, las doctrinas de una época son cuidadosamente repensadas por la siguiente y así se acercan cada vez más a la meta de la verdad objetiva. Pero incluso en una disciplina diseñada para la objetividad, se necesita un proceso. Y lleva tiempo.

No es de extrañar que en el desordenado, azaroso y emocionalmente cargado reino de las aventuras humanas cotidianas el espectro de creencias sea amplio e imaginativo, si bien a veces confuso y frustrante. En la formación de creencias, algunos miran a la ciencia, tanto en el contenido como en la estrategia. Algunos confían en la autoridad, otros en la comunidad. Algunos son coaccionados, a veces sutilmente, a veces abiertamente. Algunos ponen su mayor confianza en la tradición. Otros dan plena jurisdicción a la intuición. Y en los centros de procesamiento subterráneos de la mente, generalmente no monitoreados, cada uno de nosotros empleamos una combinación idiosincrática y altamente variable de todas estas tácticas. Es más, no hay nada que nos impida tener creencias incompatibles o emprender acciones que nos sugieran hacerlo. Me siento cómodo admitiendo que de vez en cuando toco madera o hablo con los difuntos o busco un refuerzo celestial. Nada de esto encaja en mis creencias racionales sobre el mundo, y sin embargo estoy perfectamente satisfecho con mis ocasionales inclinaciones apotropaicas. De hecho, hay un cierto placer en ir momentáneamente más allá de las restricciones racionales.

Nótese también que mientras que a los filósofos profesionales se les paga para escudriñar las creencias - para revelar suposiciones ocultas y llamar la atención sobre inferencias defectuosas - no es así como la mayoría de nosotros ahora, o nuestros antepasados entonces, lo hacen. Muchas creencias en la mayoría de las vidas quedan sin examinar. Tal vez esta es su propia variedad de adaptación. Los observadores del ombligo tienden a pasar por alto que las reservas de alimentos son bajas o que una tarántula está haciendo un acercamiento sigiloso. Lo que significa que al evaluar cómo podría ser que tal o cual creencia, imaginar que la creencia ha surgido de una intensa consideración y un minucioso examen cruzado es a menudo algo muy distinto. Como señala Boyer, "Suponemos que las nociones de agentes sobrenaturales... se presentan a la mente y que algún proceso de toma de decisiones acepta estas nociones como válidas o las rechaza". Pero debido a que estas ideas hacen cosquillas a muchos de los centros de inferencia del cerebro -desde la detección de agentes, a la teoría de la mente, al seguimiento de las relaciones, etc.- y debido a que la selección natural ha equipado a estos centros para realizar sus propios diagnósticos muy por debajo del umbral de conciencia, el modelo de juez y jurado racional "puede ser una visión bastante distorsionada de cómo se adquieren y representan tales conceptos".[34]

Incluso las mismas cosas a las que el concepto de creencia puede ser aplicado sensatamente cambian de época en época. Como señala Karen Armstrong, aquellos que llevan a cabo los ritos de los antiguos misterios eleusinos "se habrían quedado perplejos si se les hubiera preguntado si creían que Perséfone realmente había descendido a la tierra, de la manera que el mito describía". [35] Sería equivalente a preguntarse si se cree en el invierno. "¿Creer en el invierno?", responderías con razón. "Las estaciones, bueno, simplemente lo

son." De forma similar, Armstrong imagina que nuestros antepasados abrazarían los viajes de Perséfone "porque dondequiera que miraras, veías que la vida y la muerte eran inseparables, y que la tierra murió y volvió a la vida. La muerte era temible, aterradora e inevitable, pero no era el final. Si cortas una planta, y tiras la rama muerta, ésta gana un nuevo brote." [36] El mito no suplicaba por la creencia. No provocó una crisis de fe que a través de una cuidadosa deliberación fuera resuelta por sus espectadores. El mito proporcionó un esquema poético, una mentalidad metafórica, que se volvió inseparable de la realidad que iluminaba.

Tal vez, también, hay una analogía con lo que sucede en el desarrollo a largo plazo del lenguaje natural. [37] En la búsqueda del énfasis y la expresión creativa, los hablantes rocían sus frases con una metáfora tras otra. Acabo de hacerlo, pero es más que probable que apenas lo hayan notado. Espolvoreamos sal en los guisos; espolvoreamos azúcar en los pasteles. Y sin embargo, la espolvorización que he invocado es una metáfora tan completamente banal que es raro el lector para quien la frase evoca una mano que dispersa suavemente las palabras en un festín de frases recién cocinadas. Con el tiempo, las metáforas se usan tanto que cualquier cualidad poética que puedan haber poseído inicialmente se evapora gradualmente (el agua se evapora, no la poesía) y se convierten en palabras de trabajo cotidiano (los caballos trabajan, no las palabras). En una palabra, se vuelven literales. Tal vez un proceso análogo se desarrolla con las nociones mítico-religiosas. Tal vez tales nociones comienzan como formas evocativas, poéticas y metafóricas de mirar al mundo que, en una extensión de tiempo, pierden gradualmente su poesía, se despojan de su significado metafórico y pasan a la literalidad.

Lo más cerca que llego a tal literalidad es reconocer que algún u otro dios puede existir. Reconozco que nadie puede descartar esta posibilidad. Mientras la supuesta influencia de un dios no modifique de ninguna manera la progresión de la realidad que está bien descrita por nuestras leyes matemáticas, entonces ese dios es compatible con todo lo que observamos. Pero hay un enorme abismo entre la mera compatibilidad y la necesidad de explicación. Invocamos las ecuaciones de Einstein y Schrödinger, el marco evolutivo de Darwin y Wallace, la doble hélice de Watson y Crick, y una larga lista de otros logros científicos no porque sean compatibles con nuestras observaciones, que por supuesto lo son, sino porque proporcionan una estructura explicativa poderosa, detallada y predictiva para comprender nuestras observaciones. En esta medida, las doctrinas religiosas no se registran; por supuesto, muchos entre los fieles consideran esta medida irrelevante. El inconveniente es que una perspectiva literal excluye esa evaluación. Una afirmación religiosa interpretada como una afirmación literal sobre el mundo que contraviene la ley científica establecida es falsa. Punto y aparte. En tales casos, adoptar una interpretación literal está a la par de aceptar la existencia de Ramtha.

No obstante, la doctrina religiosa (o incluso la de Ramtha) puede seguir siendo parte integrante del discurso racional si estamos dispuestos a alejarnos del literalismo, escogiendo las escrituras, dejando de lado los elementos que nos parecen ofensivos o anticuados, interpretando las historias y declaraciones de manera poética o simbólica o, más simplemente, como elementos de un relato ficticio. Hay muchas razones por las que

podríamos ser atraídos a hacerlo. Podríamos encontrar alegría o consuelo al ver nuestras vidas desarrollarse dentro de una narrativa más amplia y, para algunos, más satisfactoria, dando poca importancia a las cualidades sobrenaturales de la religión o a las afirmaciones metafísicas. Podríamos obtener valor de la lectura de historias religiosas como un archivo profundamente conmovedor que captura simbólicamente las cualidades esenciales de la condición humana. Podríamos saborear el desafío de desarrollar un sistema interpretativo que cuadra las doctrinas religiosas particulares con el entendimiento científico. Podríamos encontrar gratificante superponer una sensibilidad sagrada en nuestro compromiso con el mundo, añadiendo un barniz que mejora la experiencia pero no niega la racionalidad. Podríamos beneficiarnos del apoyo y la solidaridad de la afiliación religiosa. Podríamos encontrar emocionalmente enriquecedor participar en rituales religiosos, consagrando pasajes de la vida y marcando días sagrados que nos conecten con una tradición venerable. Tales variedades de compromiso religioso pueden proporcionar actividad, motivación, comunidad y orientación que, para algunos, trazan un camino hacia una vida más rica y dotada de mayor significado. Tales variedades de compromiso religioso no requieren una creencia en la naturaleza factual del contenido religioso; reflejan una creencia en el valor de dicho contenido, independientemente de si el contenido es verídico.

Hace más de un siglo, William James ofreció un análisis perspicaz y sincero de la experiencia religiosa, que resuena con la observación del Dalai Lama sobre la física y la conciencia. James enfatizó que mientras la ciencia cultiva un enfoque objetivo e impersonal, es sólo considerando nuestros mundos internos - "el terror y la belleza de los fenómenos, la 'promesa' del amanecer y del arco iris, la 'voz' del trueno, la 'suavidad' de la lluvia de verano, la 'sublimidad' de las estrellas, y no las leyes físicas que estas cosas siguen" [38] - que podemos esperar desarrollar un relato completo de la realidad. Al igual que Descartes, James subrayaba que nuestra experiencia interior es, de hecho, nuestra *única* experiencia. La ciencia puede buscar una realidad objetiva, pero nuestro único acceso a esa realidad es a través del procesamiento subjetivo de la mente. Así, la mente humana interpreta implacablemente una realidad objetiva produciendo una subjetiva.

Y así, si la práctica religiosa - o tal vez una mejor etiqueta aquí sería la práctica espiritual - se emprende como una exploración del mundo interior de la mente, un viaje hacia el interior a través de la experiencia ineludiblemente subjetiva de la realidad, entonces las cuestiones de si esta o aquella doctrina refleja una verdad objetiva se vuelven secundarias. [39] La búsqueda religiosa o espiritual no tiene por qué buscar aspectos demostrables del mundo exterior; hay todo un paisaje interior que explorar, desde el terror y la belleza, la promesa y la voz, la gentileza y la sublimidad a las que se refería Santiago, hasta la vasta lista de otras construcciones humanas que incluyen el bien y el mal, el temor y el pavor, el asombro y la gratitud que hemos invocado a lo largo de los tiempos para ordenar el valor y encontrar el significado. Por mucho que miremos fijamente a las partículas individuales de la naturaleza, por mucho que persigamos diligentemente las reglas matemáticas fundamentales de la naturaleza, no conseguiremos ver estos conceptos. Sólo surgen cuando determinadas disposiciones complejas de partículas desarrollan las capacidades de pensar, sentir y reflexionar. Y qué espectacular y gratificante es que puedan existir tales colecciones de partículas agitadas, operando bajo el control inflexible de la ley física, y sin embargo capaces de traer estas cualidades al mundo.

Para mí, la analogía con las agudas metáforas del lenguaje desgastadas por la edad saca a relucir un punto esencial, obvio pero revelador: muchas de las religiones del mundo son antiguas. Eso es vital. Nos dice que durante siglos, si no milenios, una práctica religiosa ha captado la atención de un pueblo y en diversas combinaciones proporcionó la estructura del ritual, informó su sentido de lugar en el mundo, guió su sensibilidad moral, inspiró la creación de obras artísticas, ofreció la participación en una narración más amplia que la vida, prometió que la muerte no es el final y, por supuesto, también intimidó con duras penas, envalentonó a algunos a la batalla violenta, justificó la esclavitud y el asesinato de los transgresores, y así sucesivamente. Algunas buenas, otras malas, otras completamente horribles. Pero a través de todo esto, las tradiciones religiosas se han mantenido. Aunque decididamente no proporcionan una visión de una base verificable de la realidad material, el ámbito de la ciencia, la religión ha proporcionado a algunos de sus seguidores un sentido de coherencia que ha dado contexto a la vida, colocando lo familiar y lo exótico, las alegrías y las penas dentro de una historia más grande. Y debido a eso, las venerables religiones del mundo proporcionan linajes que conectan a sus seguidores claramente a través de los tiempos.

Fui criado como judío. Como familia, asistíamos a los servicios en los principales días festivos, y yo estaba matriculado en una escuela hebrea local. La afluencia anual de nuevos estudiantes significaba que la clase se reiniciaba cada año con el alfabeto hebreo, así que me sentaba tranquilamente a un lado y repasaba el Antiguo Testamento. Me quejé amargamente a mis padres, pero la verdad es que me gustaba leer a Samuel, Absalón, Ismael, Job y todo lo demás. Con el paso de los años, me distancié más de la religión, sintiendo poca necesidad de una participación formal. Entonces, durante un descanso de mis estudios de postgrado en Oxford, hice un viaje a Israel. Un rabino demasiado entusiasta se enteró de que un joven físico americano vagaba por las calles de Jerusalén. Lo localizó, lo rodeó de eruditos talmúdicos que "también estaban estudiando el origen del universo" y convenció -bueno, presionó- al estudiante de veinte años, excesivamente deferente, de que visitara su templo y se envolviera los brazos y la frente con el tradicional complemento de cuero del ritual del tefilín. Para el rabino, esta era la voluntad de Dios en acción. El estudiante estaba destinado a ser traído de vuelta al redil. Para el estudiante, era una coerción pesada participar en una práctica sagrada en ausencia de una convicción interna. Cuando el estudiante finalmente desenvolvió las bandas de cuero y dejó el templo, supo que había terminado.

Sin embargo, cuando mi padre murió, la llegada diaria a nuestra sala de un minyan de judíos observantes para recitar el rezo del Kaddish fue de gran consuelo. Mi padre, que no era un hombre religioso, estaba siendo abrazado por una tradición que se remontaba a miles de años, experimentando un ritual administrado a incontables antes que él. Las palabras religiosas que los hombres cantaban apenas importaban. Estaban en arameo, una colección de sonidos antiguos, una poesía tribal impresa en la cadencia y el ritmo, y no tenía interés en una traducción. Lo que me importaba en esos breves momentos - la naturaleza, si se quiere, de mi creencia - era la historia y la conexión. Eso, para mí, es la grandeza de la herencia. Eso, para mí, es la majestad de la religión.

8

INSTINTO Y CREATIVIDAD

De lo sagrado a lo sublime

El 7 de mayo de 1824, Ludwig van Beethoven apareció en el escenario del Theater am Kärntnertor de Viena para el estreno de su novena y última sinfonía. Fue la primera actuación pública de Beethoven en casi una docena de años. El programa anunciaba que Beethoven sólo ayudaría en la dirección, pero como el teatro se llenó y la anticipación se extendió entre la audiencia, no pudo contenerse. Según el primer violinista Joseph Böhm, "Beethoven mismo dirigió, es decir, se paró frente a la tribuna del director y se lanzó de un lado a otro como un loco. En un momento se estiró a su altura máxima, al siguiente se agachó en el suelo, se agitó con las manos y los pies como si quisiera tocar todos los instrumentos él mismo y cantar para todo el coro".[1] Beethoven sufría de un severo tinnitus, lo que describió como un rugido en sus oídos, y en ese momento de su vida estaba casi completamente sordo. En consecuencia, cuando la orquesta tocó su última nota triunfal, sin darse cuenta se había retrasado unos pocos compases y seguía dirigiendo con fiereza. La contralto tomó suavemente de la manga de Beethoven y lo giró para enfrentar al público, con pañuelos agitados y gritando fuertemente. Beethoven lloró. ¿Cómo podía saber que los sonidos que había escuchado sólo en su mente tocarían un acorde universal en el corazón de la humanidad?

Nuestros mitos y religiones revelan cómo nuestros antepasados trataron colectivamente de dar sentido al mundo. Abrazando historias, rituales y creencias, nuestras tradiciones han buscado, a veces con compasión, a veces con una brutalidad no contada, una narración para explicar el viaje hasta ahora y para impulsarnos a seguir adelante desde aquí. Como individuos, hemos recorrido el mismo camino, confiando en el instinto y el ingenio para salvaguardar la supervivencia mientras buscamos la rima y la razón de por qué nos debería importar. Algunos en este viaje capturarían la coherencia de la realidad de formas nuevas y sorprendentes, ofreciendo reflexiones a través de obras de la literatura, el arte, la música y la ciencia que redefinirían nuestro sentido del yo y enriquecerían nuestra relación con el mundo. El espíritu creativo, que desde hacía mucho tiempo había estado cincelando figuritas, coloreando paredes de cuevas y contando historias, estaba listo para volar.

Mentes magníficas -raras pero surgidas en todas las épocas, todas formadas por la naturaleza y algunas por inspiración imaginaria de lo divino- descubrirían nuevas formas de articular lo trascendente. Sus odiseas creativas expresarían una variedad de verdades más allá de la derivación o validación, dando voz a cualidades definitorias de la naturaleza humana que permanecen en silencio hasta que se experimentan.

Para crear

La sensibilidad a los patrones está entre nuestras habilidades de supervivencia más potentes. Como hemos visto repetidamente, observamos patrones, experimentamos patrones y, lo más importante, aprendemos de ellos. Si me engañas una vez, te avergüenzas. Engañadme dos veces, y aunque puede ser prematuro declararme culpable, la tercera o cuarta vez, tal cambio de responsabilidad está justificado. Aprender de los patrones es un talento de supervivencia esencial impreso por la evolución en nuestro ADN. Los visitantes alienígenas que llegan a la Tierra pueden subsistir gracias a una bioquímica diferente, pero probablemente no tengan dificultad en comprender el concepto; casi con toda seguridad, el análisis de patrones es fundamental para que ellos también prevalezcan.

Sin embargo, tal intercambio intergaláctico puede no ser un encuentro perfecto de mentes. Algunos de nuestros apreciados patrones podrían dejar a nuestros visitantes alienígenas desconcertados. Disponer determinados pigmentos en un lienzo blanco o arrancar determinados trozos de una masa de mármol o generar vibraciones particulares a través de las moléculas de aire que se agitan, produciendo patrones particulares de luz, textura y sonido, y al encontrar tales patrones, los humanos podemos sentir la realidad abierta en formas que nunca imaginamos posibles. Por un breve pero aparentemente ilimitado momento podemos sentir que nuestro lugar en el mundo cambia como si hubiéramos sido transportados a otro reino. Si los extraterrestres han tenido este tipo de experiencias, entenderán de lo que estamos hablando. Pero cuando relatamos nuestra respuesta interna a los trabajos creativos, hay una posibilidad de que nos miren fijamente. Y como el lenguaje puede llegar tan lejos en la descripción de estas experiencias, los extraterrestres pueden tener una expresión desconcertante cuando miran de continente a continente y ven grandes cantidades de nuestra especie, algunos por sí mismos, otros en grupos, concentrándose y absorbiendo intensamente y golpeando y girando mientras se envuelven en mundos de arte y música.

Desconcertados por nuestra respuesta a la expresión artística, los visitantes alienígenas estarán igual de desconcertados, quizás más, por la creación de tales obras. La página en blanco. El lienzo prístino. La masa de mármol sin formar. La masa de arcilla. La partitura no escrita que espera la inspiración del compositor, o, una vez compuesta, espera ser tocada. O cantada. O bailada. Algunas de nuestras especies pasan sus días y noches imaginando formas para extraer de lo informe y sonidos para verterlos en el silencio. Algunos gastarán el núcleo de la energía de su vida realizando estas visiones imaginativas, produciendo patrones en el espacio y el tiempo que pueden ser reverenciados, o aborrecidos, o ignorados, o considerados la esencia misma de la existencia. "Sin música",

dijo Friedrich Nietzsche, "la vida sería un error". [2] Y, en palabras de Ecrasia de George Bernard Shaw, "Sin el arte, la crudeza de la realidad haría el mundo insoportable." [3] Pero, ¿qué es lo que provoca el impulso imaginativo? ¿Es catalizado por instintos de comportamiento formados por la selección natural? ¿O hemos estado gastando durante mucho tiempo preciosos recursos de tiempo y energía en actividades artísticas que tienen poca conexión con la supervivencia y la reproducción?

Nos lanzan al mundo sin consultar. Una vez aquí, se nos concede permiso para abrazar la vida sólo por un momento. Qué elevado es tomar las riendas de la creación y crear algo que controlamos, algo intrínsecamente nuestro, algo que es un reflejo de lo que somos, algo que captura nuestra peculiar forma de ver la existencia humana. Mientras que muchos de nosotros rechazarían la oportunidad de cambiar de lugar con Shakespeare o Bach, Mozart o van Gogh, Dickinson o O'Keeffe, muchos saltarían a la oportunidad de ser infundidos con su maestría creativa. Iluminar la realidad con faros de nuestra propia fabricación, mover el mundo con obras que fluyen a través de nuestra particular composición molecular, crear experiencias que puedan resistir la prueba del tiempo... todo esto suena muy romántico. Para algunos, hay magia en el proceso creativo, un impulso irreprimible de auto-expresión. Otros ven una oportunidad para elevar su estatus y su estima. Para otros aún, hay un guiño a la eternidad; nuestras creaciones artísticas, como Keith Haring dijo una vez, son una "búsqueda de la inmortalidad".[4]

Si la creación y el consumo de obras de la imaginación fueran una adición reciente al comportamiento humano, o si estas actividades sólo se practicaran en raras ocasiones a lo largo de la historia humana, es poco probable que revelaran las cualidades universales de nuestra naturaleza humana evolucionada. Después de todo, algunas cosas como los pantalones de campana y los plátanos fritos se derivan de peculiaridades contingentes, y por lo tanto el análisis de los detalles de su linaje histórico sólo ofrece una iluminación limitada. Pero el hecho es que, en el pasado y en las tierras habitadas, hemos estado cantando y bailando y componiendo y pintando y esculpiendo y tallando y escribiendo. Las pinturas rupestres y los elaborados bienes funerarios, como se ha visto en el capítulo anterior, datan de hace treinta o cuarenta mil años. Se han descubierto grabados y artefactos que muestran evidencia de expresión artística de unos pocos cientos de miles de años antes. [5] Nos enfrentamos a un comportamiento que es omnipresente y, sin embargo, a diferencia de comer, beber y procrear, no lleva su valor de supervivencia en la manga.

Con una sensibilidad moderna, esto puede no parecerle desconcertante. Experimentar una obra que anima el alma o nos hace llorar es ir más allá de lo cotidiano, y ¿quién no se emocionaría con una experiencia como esa? Pero como con la observación superficial de que comemos helado porque nos gustan los dulces, esta explicación se centra únicamente en nuestras respuestas próximas y por lo tanto se limita al impulso más inmediato de las inclinaciones creativas. ¿Podemos ir más profundo? ¿Podemos comprender por qué nuestros antepasados estaban tan dispuestos a dejar los desafíos demasiado reales de la supervivencia y gastar su precioso tiempo, energía y esfuerzo en la imaginación?

Cuando nos encontramos con nuestros primeros hermanos contando historias, consideramos una pregunta similar, y la respuesta más convincente invocó la metáfora del simulador de vuelo: a través del uso creativo del lenguaje hemos experimentado perspectivas familiares y extrañas, permitiéndonos ampliar y refinar nuestras respuestas a los encuentros en el mundo real. Al contar y escuchar historias y al adornar y repetir historias, jugamos con la posibilidad sin sufrir consecuencias. Seguimos un camino tras otro que comenzaba con "¿Qué pasaría si...?" y, a través de la razón y la fantasía, exploramos una gran cantidad de posibles resultados. Nuestras mentes vagaban libremente por el paisaje de la experiencia imaginada, dándonos una nueva agilidad de pensamiento que, plausiblemente, resultó ser valiosa para la supervivencia.

A medida que consideramos formas más abstractas de arte, esta explicación debe ser revisada. Una cosa es imaginar la mente puliendo los ideales de coraje y heroísmo a través de fascinantes cuentos de batallas duramente ganadas o fascinantes relatos de viajes traicioneros. Otra cosa es argumentar que la mente ejercitó un músculo de adaptación escuchando a Édith Piaf o Igor Stravinsky del Pleistoceno. Hay un gran abismo entre experimentar la música - o, para el caso, la pintura o la danza o la escultura - y superar los desafíos encontrados en el mundo ancestral.

El mismo Darwin consideró la potencial función de adaptación de un sentido artístico innato motivado por el famoso rompecabezas evolutivo de la cola del pavo real. Una cola grande y de colores brillantes hace que sea un desafío para que un pavo real se esconda y, cuando es perseguido por un depredador que se acerca rápidamente, hace que sea un desafío para escapar. ¿Por qué evolucionaría una estructura tan grande y hermosa, pero aparentemente inadaptada? La respuesta, concluyó Darwin después de mucha consternación, es que aunque la cola del pavo real puede ser una bola y una cadena en la lucha por la supervivencia, la cola es sin embargo una parte esencial de la estrategia reproductiva del pavo real. No sólo los humanos encontramos atractiva la cola del pavo real. Los pavos reales también lo hacen. Se sienten atraídos por las plumas vivaces, y así, cuanto más impresionante sea su cola, más probable es que el pavo real se aparee. La progenie resultante, a su vez, tiene una buena oportunidad de heredar los rasgos de papá y los gustos de mamá, propagando una guerra genética en la que las batallas se ganan no adquiriendo más comida o asegurando una mayor seguridad, sino haciendo crecer colas más resplandecientes.

Es un ejemplo de *selección sexual,* un mecanismo evolutivo darwiniano cuyos engranajes son impulsados por el acceso a la reproducción. Un pavo real que muere joven no se reproducirá, la misma razón por la que la selección natural favorece a los que sobreviven. Pero el mismo fallo reproductivo le ocurrirá a un pavo real que vive mucho tiempo y prospera, pero que es rechazado por todas las parejas potenciales. Para influir en la composición biológica de las generaciones siguientes, la supervivencia es necesaria pero no suficiente. Producir descendencia es lo que importa, por lo que las características que promueven el apareamiento disfrutarán de una ventaja selectiva, a veces incluso a expensas de la seguridad. [6] Tales costos no pueden ser astronómicos -hay un límite a lo poco

manejable que pueden ser las colas antes de que la supervivencia esté completamente en peligro- pero no tienen por qué ser gratuitos. Y aunque la cola del pavo real es el ejemplo, consideraciones similares son aplicables a muchas especies. Los manakins de barba blanca se pavonean con sus movimientos en estridentes bailes de mosh pit para atraer a posibles parejas; las luciérnagas muestran con éxito hipnóticos despliegues de cortejo encendiendo la delicadeza de sus revoloteantes espectáculos de luces; los machos construyen elaboradas madrigueras de solteros, entrelazando ramitas, hojas, conchas e incluso coloridos envoltorios de caramelos en un ostentoso despliegue que aparentemente no sirve a otro propósito que el de seducir a una futura Sra. Bowerbird.[7]

Cuando Darwin describió por primera vez la selección sexual en su libro de dos volúmenes de 1871, *El Descenso del Hombre y la Selección en Relación con el Sexo*, la propuesta no fue un éxito instantáneo. A muchos de sus contemporáneos les parecía inconcebible que el comportamiento en el reino brutal de los animales no humanos pudiera depender de respuestas estéticas. [8] No es que Darwin imaginara pájaros o ranas perdidos en un ensueño poético, mirando los rayos rojizos del sol mientras se sumerge en el horizonte. El sentido estético que proponía se centraba únicamente en la selección de pareja. Aún así, la atribución de Darwin de un "gusto por lo bello" [9] a una amplia franja del reino animal parecía arrogante. Diablos, para Alfred Russel Wallace, que veía las sensibilidades estéticas humanas como un regalo de Dios, era indecoroso.[10]

Pero si no invocamos una sensibilidad innata a la belleza, ¿cómo explicamos los lujosos adornos corporales, las muestras creativas y las construcciones físicas que son parte integral de la miríada de juegos de apareamiento que se llevan a cabo en el reino animal? Bueno, hay un enfoque menos elevado. Consideremos de nuevo la cola del pavo real. Mientras que los humanos podemos apreciar la estética del plumaje de un pavo real, a un peahen puede despertar una respuesta instintiva de considerable importancia genética. Los pavos reales adornados con un plumaje deslumbrante son fuertes y sanos, aumentando la probabilidad de que engendren descendientes resistentes. Y como los pavos reales, al igual que las hembras en la mayoría de las especies, pueden producir mucha menos descendencia que sus homólogos masculinos, han desarrollado una preferencia especialmente fuerte por los machos aptos; tales uniones aumentan la tasa de éxito de cada fertilización que consume recursos y, por lo tanto, es preciosa. [11] Siendo el rico plumaje una demostración visible de la fuerza y el vigor de una pareja potencial, las gallinas atraídas por tales colas tienen más probabilidades de engendrar duraznos robustos. Estos melocotones, a su vez, estarán dotados, en promedio, de los mismos genes para desear y adquirir un plumaje resplandeciente, facilitando la difusión de tales rasgos a través de las generaciones futuras. La belleza, en este análisis de la selección sexual, es mucho más que la piel. La belleza equivale a credenciales disponibles públicamente que atestiguan la capacidad de adaptación de una pareja potencial.

En cualquiera de los dos casos -ya sea que la elección de pareja esté impulsada por sensibilidades estéticas o por evaluaciones de salud- las preferencias resultantes pueden proporcionar una justificación para rasgos costosos, corporales y de comportamiento, cuyos beneficios intrínsecos de supervivencia son cuestionables. Como esta descripción parece aplicable a las prácticas artísticas de nuestra especie, de larga data y esencialmente

universales, tal vez la selección sexual ofrece una iluminación. Darwin pensó que podría serlo. Invocó la selección sexual para explicar la inclinación humana a los piercings y las coloraciones corporales y sugirió también que la poderosa respuesta que la música puede provocar es un resultado evolutivo de la selección sexual que da forma a las llamadas de apareamiento humanas. Los machos que mejor podían cantar o bailar, o que tenían los tatuajes más atractivos o prendas de vestir decoradas, pueden haber sido el objetivo de las hembras exigentes y así más fácilmente engendrar una progenie artísticamente afinada. En "chico conoce a chica", el talento artístico puede haber determinado si el chico se fue a casa solo.

Más recientemente, el psicólogo Geoffrey Miller, y también el filósofo Denis Dutton, han desarrollado más esta perspectiva, sugiriendo que las capacidades artísticas humanas proporcionan un indicador de la aptitud física examinado por mujeres perspicaces. [12] No sólo los artefactos elaborados por expertos, las exhibiciones creativas y las actuaciones energéticas demuestran una mente y un cuerpo que se disparan a toda potencia, sino que tales obras también atestiguan que el artista está generosamente dotado del material adecuado para sobrevivir. Después de todo, según el razonamiento, sólo en virtud de la posesión de recursos materiales y proezas físicas podría el artista permitirse la extravagancia de gastar tiempo y energía en actividades que carecen de valor de supervivencia. (Los artistas del Pleistoceno, al parecer, no se morían de hambre.) Desde este punto de vista, los emprendimientos artísticos equivalen a una estrategia de marketing autopromocional que da como resultado la unión entre artistas talentosos y compañeros discriminatorios, dando como resultado una progenie que tiene más probabilidades de estar dotada de rasgos similares.

La selección sexual como motor evolutivo de la actividad artística humana es intrigante, pero ha generado más conflictos que acuerdos. Los investigadores han planteado muchas cuestiones: ¿Es el talento artístico una señal precisa para la salud física? ¿Podrían las capacidades artísticas estar tan entrelazadas con la inteligencia y la creatividad crudas, cualidades con un valor de supervivencia incuestionable, que las predilecciones artísticas se extiendan a través de la selección natural sin necesidad de invocar la selección sexual? Con el enfoque de la selección sexual en los artistas masculinos, ¿cómo explica la teoría las actividades artísticas de las mujeres? Y quizás lo más desafiante de todo, el compromiso público con las actividades artísticas durante el Pleistoceno, así como los rituales de cortejo y las prácticas de apareamiento de esa época son en gran medida una cuestión de conjetura. Claro, las conquistas de Lucian Freud y Mick Jagger pueden ser legendarias, pero ¿qué tal si algo nos dice sobre la importancia de la habilidad artística o la presencia en el escenario para el acceso reproductivo entre los primeros homínidos? A la luz de tales preocupaciones, Brian Boyd ha ofrecido un considerado resumen: "La selección sexual ha sido un engranaje extra para el arte, no el motor en sí mismo".[13]

Steven Pinker sugiere una perspectiva totalmente diferente sobre la utilidad adaptativa de las artes. En un pasaje que ha sido citado frecuentemente tanto por los partidarios como por los detractores, argumenta que todas las artes del lenguaje, excepto las de la lengua, equivalen a postres nutricionales en bancarrota que se sirven a cerebros humanos obsesionados con los patrones. De la misma manera que "la tarta de queso tiene un sabor

sensual que no se parece a nada en el mundo natural porque es una mezcla de megadosis de estímulos agradables que preparamos con el propósito expreso de presionar nuestros botones de placer", [14] las artes, según Pinker, son creaciones adaptables e inútiles diseñadas para excitar artificialmente los sentidos humanos que evolucionaron para promover la salud de nuestros antepasados. Esto no es un juicio de valor. Los agudos argumentos de Pinker, rebosantes de alusiones culturales, dejan claro que tiene un profundo afecto por las artes. En cambio, esta es una evaluación desapasionada de si las artes han jugado un papel en una tarea en particular: mejorar la perspectiva de que en el mundo ancestral los genes de nuestros antepasados, y no los de nuestros primos filisteos, sordos de tono, zurdos y filisteos, fueron transmitidos a la siguiente generación. Y es hacia este fin que Pinker argumenta que las artes son irrelevantes.

La evolución seguramente nos ha llevado a una serie de comportamientos dirigidos a aumentar nuestra aptitud biológica, desde encontrar comida, conseguir pareja y garantizar la seguridad hasta establecer alianzas, rechazar adversarios e instruir a la progenie. Los comportamientos hereditarios que, en promedio, resultaron en un mayor éxito reproductivo se extendieron ampliamente y se convirtieron en los mecanismos para superar los desafíos de adaptación particulares. Al dar forma a algunos de estos comportamientos, una zanahoria que la evolución esgrimió fue el placer: si encuentras placenteras las conductas particulares que promueven la supervivencia, es más probable que las emprendas. Y en virtud de sus cualidades de promoción de la supervivencia, estos comportamientos aumentarán la probabilidad de que te quedes el tiempo suficiente para reproducirte, dotando a las generaciones futuras de tendencias de comportamiento similares. La evolución genera así una colección de bucles de retroalimentación auto-refuerzo que hace placenteros los comportamientos que mejoran la aptitud física. En opinión de Pinker, las artes cortan los bucles de retroalimentación, cortan los beneficios de adaptación, y estimulan directamente nuestros centros de placer, produciendo experiencias gratificantes que desde una perspectiva evolutiva no se ganan. Nos gusta cómo las artes pueden hacernos sentir, pero ni crearlas ni experimentarlas nos hace más aptos o atractivos. Desde el punto de vista de la supervivencia, las artes son comida basura.

La música es el niño del cartel de Pinker, el género de las artes cuya irrelevancia adaptativa expone más completamente. Sugiere que la música es un parásito auditivo, que se aprovecha de las sensibilidades auditivas emocionalmente evocadoras que hace tiempo proporcionaron valor de supervivencia a nuestros antepasados. Por ejemplo, los sonidos cuyas frecuencias están relacionadas armónicamente (frecuencias que son múltiplos de una frecuencia común) indican una fuente única y potencialmente identificable (la física básica revela que cuando un objeto lineal vibra, ya sean las cuerdas vocales de un depredador o un arma hecha de hueso ahuecado, las frecuencias vibratorias tienden a llenar una serie armónica). Aquellos de nuestros antepasados que respondían más placenteramente a esos sonidos organizados les habrían prestado más atención y, por lo tanto, habrían adquirido una mayor conciencia de su entorno. El mayor conocimiento habría inclinado la balanza de la supervivencia a su favor, aumentando su bienestar y promoviendo un mayor desarrollo de la sensibilidad auditiva. El aumento de la receptividad a otros sonidos ricos en información, desde el trueno a las pisadas y al agrietamiento de las ramas, habría agudizado

aún más la atención y por lo tanto llenado aún más la conciencia ambiental. Y así, aquellos de nuestros antepasados que estaban más sintonizados sónicamente poseían una ventaja en cuanto a la aptitud, promoviendo la difusión de la sensibilidad auditiva en las generaciones posteriores. De acuerdo con Pinker, la música se apropia de tal sensibilidad sónica y la toma como un paseo de placer sensual que no confiere ningún valor de adaptación. Así como la tarta de queso estimula artificialmente nuestra antigua preferencia adaptativa por los alimentos con elevado contenido calórico, la música estimula artificialmente nuestra antigua sensibilidad adaptativa a los sonidos con elevado contenido de información.

La yuxtaposición de Pinker del placer culpable con la experiencia enrarecida es impactante. Intencionalmente. El punto no es degradar nuestra experiencia del arte sino ampliar nuestra asignación de significado. Para estar seguros, hay algo muy satisfactorio en la identificación de una base evolutiva para este o aquel comportamiento humano, proporcionando un sello indeleble de aprobación impreso en nuestro ADN. ¿Cuán gratificante es imaginar que las artes, consideradas por muchos como uno de los logros más exaltados de la humanidad, han jugado un papel esencial en la supervivencia de la especie? Pero por muy agradable que sea, tal explicación no tiene por qué ser cierta. Ni tampoco esencial. La adaptación biológica no es la única norma de valor. Es igual de maravilloso que podamos elevarnos por encima de las preocupaciones por la supervivencia y usar la imaginación para expresar algo bello o inquietante o desgarrador. La importancia no requiere una utilidad adaptativa. Hace años, durante una cena familiar en un restaurante local, mientras un camarero entregaba tarta de queso en una mesa cercana, mi madre, que estaba constantemente a dieta, se sintió obligada a ponerse de pie y saludar, un gesto de respeto que puede aplicarse no sólo al postre en sí, sino a los comportamientos humanos dominantes que, en opinión de Pinker, han obtenido la clasificación adaptativa de ese postre.

Imaginación y supervivencia

El reconocimiento de que las artes no tienen por qué avergonzarse de la falta de utilidad adaptativa no ha disuadido a los investigadores de seguir buscando explicaciones darwinianas directas para su resistencia y ubicuidad. Explicaciones, es decir, que intentan vincular directamente las actividades artísticas con la supervivencia de nuestros antepasados. En esta búsqueda, la antropóloga Ellen Dissanayake ha subrayado la necesidad de considerar las artes tal y como se practicaban en contextos ancestrales, argumentando que a lo largo de la historia de la humanidad, el arte, y también la religión, no eran diversiones extracurriculares "que se dieran el gusto una mañana a la semana o cuando no había nada mejor que hacer, ni tampoco eran pasatiempos superfluos que se pudieran rechazar por completo". 15 Ya sea descendiendo a las profundidades del inframundo para adornar la pared de una cueva o tocando salvajemente los tambores, bailando y cantando en un trance de otro mundo, el arte, como la religión, se tejió en el tapiz de la existencia antigua. Y ahí reside un potencial papel de adaptación.

Si los extraterrestres visitaron la tierra del Paleolítico y apostaron por quién sería el líder un millón de años más tarde, el género *Homo* puede no haber inspirado muchas apuestas. Sin embargo, al unir fuerza y cerebro, fuimos capaces de prevalecer sobre formas de vida más grandes, más fuertes y más rápidas, así como las dotadas de sentidos más refinados de olfato, vista y sonido. Triunfamos porque somos ingeniosos y creativos, ciertamente, pero sobre todo porque somos excepcionalmente sociales. En los capítulos anteriores hemos tratado una serie de mecanismos, desde la narración de historias hasta la religión y la teoría de juegos, que pueden haber facilitado nuestra capacidad de reunirnos en grupos productivos. Pero como tal comportamiento es tan complejo como influyente, buscar una sola explicación puede ser demasiado estrecho. Varias amalgamas de estos mecanismos pueden haber sido importantes para nuestras exitosas tendencias grupales, y como Dissanayake y otros investigadores han sugerido, la lista de influencias prosociales debería extenderse para incluir el arte.

Si usted y yo confiamos en que cada uno de nosotros comprenderá y anticipará las respuestas emocionales del otro, incluso cuando nos encontremos con desafíos desconocidos y busquemos nuevas oportunidades, hay más posibilidades de que cooperemos con éxito. Las artes pueden haber sido esenciales para lograr esto. Si usted y yo y otros en nuestro grupo hubiéramos participado frecuentemente en las mismas experiencias artísticas ritualizadas, uniéndose a través de un ritmo, una melodía y un movimiento energéticos, la unidad de tan intensos viajes emocionales habría creado un sentido de solidaridad comunitaria. Cualquiera que haya participado en un grupo prolongado de tambores, cantos o movimientos conoce el sentimiento; si no es así, lo recomiendo encarecidamente. Intensos y aparentemente más grandes que la vida, estos episodios emocionales compartidos nos habrían unido en un todo más comprometido. Como ha subrayado Noël Carroll, un filósofo que también ha estado a la vanguardia de estas ideas, "El arte ha consistido en agitar y dar forma a las emociones de una manera que une e inculca a los que están bajo su influencia como participantes de una cultura". [16] Y, de hecho, la noción misma de cultura -un conjunto de tradiciones, costumbres y perspectivas ampliamente compartidas- se basa en un patrimonio común de prácticas y experiencias artísticas. Los miembros de tales grupos emocionalmente sintonizados tenían una mejor oportunidad de sobrevivir y transmitir una tendencia genética de tales comportamientos a las generaciones siguientes.

Ahora, si no te moviera la cohesión del grupo como una explicación adaptable para la religión, podrías no moverte por la cohesión del grupo como una explicación adaptable para el arte. Pero al igual que en nuestra discusión sobre religión, no necesitamos centrarnos únicamente en los grupos. El arte puede haber tenido una utilidad adaptativa directamente a nivel del individuo, una perspectiva que encuentro particularmente convincente. Las artes proveen una arena sin límites por las restricciones de la verdad de pies planos y la realidad física diaria, permitiendo a la mente saltar y girar y dar vueltas mientras explora todo tipo de novedad imaginada. Una mente que se adhiere asiduamente a lo que es verdad es una mente que explora un reino totalmente limitado de posibilidades. Pero una mente que se acostumbra a cruzar libremente el límite entre lo real y lo imaginado, sin dejar de vigilar lo que es, es una mente que se hace experta en romper las ataduras del pensamiento

convencional. Tal mente está preparada para la innovación y el ingenio. La historia lo pone de manifiesto. Debemos muchos de los mayores avances de la ciencia y la tecnología a una colección de individuos que fueron capaces de mirar los mismos problemas que habían confundido a generaciones de pensadores anteriores y tienen la flexibilidad de pensamiento para ver esos problemas de manera diferente.

El paso esencial de Einstein hacia la relatividad no fue impulsado por nuevos experimentos o datos. Él estaba trabajando con hechos, relacionados con la electricidad, el magnetismo y la luz, que ya eran conocidos. En cambio, el audaz movimiento de Einstein fue liberarse de la ampliamente sostenida suposición de que el espacio y el tiempo eran constantes, lo que requería que la velocidad de la luz variara, y en su lugar visualizar que la velocidad de la luz es constante, lo que requería que el espacio y el tiempo variaran. Este resumen tipo eslogan no tiene por objeto explicar la relatividad especial (para ello, les remito, por ejemplo, al capítulo 2 de *El Universo Elegante*) sino más bien señalar que el descubrimiento se basó en imaginar un simple pero fundamental reordenamiento de los trozos de realidad de Lego, una inversión de patrones simbólicos tan familiares que la mayoría de las mentes se deslizaron por completo sobre la posibilidad. Es una variedad de maniobras creativas que resuena con los más altos niveles de composición artística. En la evaluación del ilustre pianista Glenn Gould, el genio de Bach queda demostrado por su capacidad para idear líneas melódicas "que cuando se transponen, invierten, hacen retroceder o se transforman rítmicamente todavía exhiben... algún perfil completamente nuevo pero completamente armonioso". [17] El genio de Einstein se basó en una capacidad similar, y de forma igualmente asombrosa, de reconfigurar los bloques de construcción del entendimiento, mirando de nuevo a conceptos que habían sido escudriñados durante décadas, si no siglos, y combinándolos de acuerdo con un novedoso plan. Que Einstein describiera su proceso intelectual como pensar con música y que frecuentemente se basara en exploraciones visuales libres de ecuaciones y palabras quizás no sea tan sorprendente. El arte de Einstein era escuchar ritmos y ver patrones que revelaban una profunda unidad en el funcionamiento de la realidad.

Ni la relatividad de Einstein ni las fugas de Bach son algo con lo que se pueda sobrevivir. Sin embargo, cada una es un ejemplo consumado de las capacidades humanas que fueron esenciales para que prevaleciéramos. El vínculo entre la aptitud científica y la resolución de los desafíos del mundo real puede ser más evidente, pero las mentes que razonan con analogía y metáfora, las mentes que representan con color y textura, las mentes que imaginan con melodía y ritmo son mentes que cultivan un paisaje cognitivo más floreciente. Lo cual es sólo para decir que las artes bien podrían haber sido vitales para desarrollar la flexibilidad de pensamiento y la fluidez de la intuición que nuestros parientes necesitaban para fabricar la lanza, inventar la cocina, aprovechar la rueda, y, más tarde, escribir la Misa en Si Menor y, aún más tarde, romper nuestra rígida perspectiva del espacio y el tiempo. A lo largo de cientos de miles de años, los esfuerzos artísticos pueden haber sido el patio de recreo de la cognición humana, proporcionando un campo seguro para entrenar nuestras capacidades imaginativas e infundiéndoles una potente facultad para la innovación.

También hay que tener en cuenta que los papeles de adaptación del arte que hemos considerado -afirmar la innovación y fortalecer los lazos sociales- funcionan en tándem. La innovación es el soldado de infantería de la creatividad. La cohesión del grupo es el ejército de la implementación. El éxito en la incesante batalla por la supervivencia requiere de ambas cosas: ideas creativas que se implementen con éxito. El hecho de que las artes estén en el nexo de ambos sugiere un papel de adaptación más allá de la mera pulsación de los botones de placer. Claro, es posible que las artes sean un subproducto adaptable sin importancia pero profundamente placentero de un gran cerebro que alberga una mente creativa, pero para muchos investigadores eso no tiene en cuenta la capacidad del arte para esculpir nuestro compromiso con la realidad. Brian Boyd ha hecho este punto de manera sucinta: "Al refinar y fortalecer nuestra socialidad, al prepararnos para usar los recursos de la imaginación, y al aumentar nuestra confianza en la formación de la vida en nuestros propios términos, el arte altera fundamentalmente nuestra relación con nuestro mundo".[18]

Soy parcial a la opinión de que agudizar el ingenio, ejercitar la creatividad, ampliar la perspectiva y construir la cohesión proporciona un modelo de cómo las artes importan a la selección natural. Con esta perspectiva las artes unen el lenguaje, la historia, los mitos y la religión como el medio por el cual la mente humana piensa simbólicamente, razona en contra de la realidad, imagina libremente y trabaja en colaboración. A lo largo del tiempo, son estas capacidades las que han dado lugar a nuestro mundo cultural, científico y tecnológicamente rico. De todos modos, incluso si su visión del papel evolutivo del arte se inclina hacia los postres cremosos, seguramente podemos estar de acuerdo en que una miríada de formas de arte han sido una presencia constante y valiosa a lo largo de la historia de la humanidad. Lo que significa que las vidas internas y los intercambios sociales han adoptado modos de compromiso que no dan prioridad a la información objetiva transmitida a través del lenguaje.

¿Qué nos dice esto sobre el arte y la verdad?

El arte y la verdad

Hace unos veinte años, en uno de esos gloriosos días soleados de otoño con hojas que se volvían rojas y naranjas quemadas, estaba conduciendo solo por una autopista desde la ciudad de Nueva York hasta nuestra casa familiar al norte del estado cuando, aparentemente de la nada, un perro se lanzó al otro lado de la carretera. Frené bruscamente, pero un momento antes de que el auto se detuviera, sentí un golpe seco seguido de otro, mientras las ruedas delanteras y traseras atropellaban al perro. Saltando del auto, levanté al perro, despierto pero apenas moviéndose, al asiento del pasajero y salí corriendo por los caminos del campo en busca de un veterinario. Minutos después, de alguna manera, el perro se sentó derecho. Puse mi mano ligeramente sobre su cabeza, que inmovilizó con su cuerpo contra el asiento mientras se desplomaba. Me detuve. Ella miró hacia arriba con una intensidad sin parpadear. Dolor. Terror. Resignación. Una mezcla de todo lo que parecía. Entonces, presionando su cuerpo más fuerte contra mi mano, como si no pudiera soportar irse sola, murió.

He tenido mascotas que han muerto. Esto fue diferente. Repentino. Fuerte. Violento. Con el tiempo, el shock desapareció, pero el momento final se quedó conmigo. Mi yo racional sabe que estoy leyendo un significado indebido en un desafortunado pero demasiado común suceso. Sin embargo, la transición de la vida a la muerte de un animal que encontré por casualidad y que había muerto por mi propia mano, aunque sin intención, tuvo un extraño e inesperado tirón sobre mí. Llevaba consigo un cierto tipo de verdad. No una verdad propositiva. No es una cuestión de hecho. Nada que pudiera medir de forma significativa. Pero en ese momento, sentí algo que cambió ligeramente mi sentido del mundo.

Puedo identificar una pequeña colección de otras experiencias que, cada una a su manera, me han dejado con un sentimiento similar. Sostener a mi primera hija por primera vez; agacharme en una grieta rocosa en las colinas a las afueras de San Francisco mientras una tormenta de viento aullaba sobre mi cabeza; escuchar a mi joven hija cantar en solitario en una reunión escolar; resolver repentinamente una ecuación que había resistido meses de intentos anteriores; observar desde una orilla a lo largo del río Bagmati cómo una familia nepalí realizaba el ritual de la quema de un miembro de la familia fallecido; esquiar, no, agitarse por una pendiente de doble diamante en Trondheim, y de alguna manera sobrevivir. Tienes tu propia lista. Todos la tenemos. Experiencias que nos llaman totalmente la atención y que provocan respuestas emocionales que valoramos incluso en ausencia - o quizás debido a la ausencia - de una descripción completamente racional o lingüística. Lo que es curioso, aunque probablemente común, es que mientras mi propio proceso de trabajo está basado en el lenguaje, no siento ninguna necesidad de explorar estas experiencias con palabras. Cuando pienso en ellas, no siento ninguna falta de comprensión pidiendo una aclaración lingüística. Ellas expanden mi mundo sin necesidad de interpretación. Estos son los momentos en que mi narrador interior sabe que es hora de tomar un descanso. Una vida examinada no tiene por qué ser una vida articulada.

El arte más fascinante puede inducir en nosotros estados enrarecidos de mente y cuerpo comparables a los producidos por nuestros encuentros en el mundo real más afectados, de manera similar moldeando y mejorando nuestro compromiso con la verdad. La discusión, el análisis y la interpretación pueden dar forma a estas experiencias, pero las más potentes no dependen de un intermediario lingüístico. De hecho, incluso para las artes basadas en el lenguaje, son las imágenes y las sensaciones las que, en las experiencias más conmovedoras, dejan la marca más duradera. Como lo describe elegantemente la poetisa Jane Hirshfield, "Cuando un escritor introduce en el lenguaje una nueva imagen que es totalmente correcta, lo que es conocible de la existencia se expande".[19] El premio Nobel Saul Bellow habla también de la singular capacidad del arte para expandir lo conocible: "Sólo el arte penetra lo que el orgullo, la pasión, la inteligencia y el hábito erigen por todos lados - las aparentes realidades de este mundo. Hay otra realidad, la genuina, que perdemos de vista. Esta otra realidad siempre nos está enviando pistas, que sin el arte, no podemos recibir." Y sin esa otra realidad, notas de Bellow, canalizando los pensamientos establecidos por Proust, la existencia se reduce a una "terminología para fines prácticos que falsamente llamamos vida".[20]

La supervivencia se basa en la acumulación de información que describe el mundo con precisión. Y el progreso, en el sentido convencional de un mayor control sobre nuestro entorno, requiere una clara comprensión de cómo estos hechos se integran en el funcionamiento de la naturaleza. Tales son las materias primas para crear fines prácticos. Son la base de lo que llamamos verdad objetiva y a menudo se asocian con el entendimiento científico. Pero por muy exhaustivo que sea este conocimiento, siempre se quedará corto para proporcionar un relato exhaustivo de la experiencia humana. La verdad artística toca una capa distinta; cuenta una historia de nivel superior, una que en palabras de Joseph Conrad "apela a esa parte de nuestro ser que no depende de la sabiduría" y habla en cambio de "nuestra capacidad de deleite y asombro, del sentido de misterio que rodea nuestras vidas"; a nuestro sentido de lástima, y belleza, y dolor; al sentimiento latente de compañerismo con toda la creación... en los sueños, en la alegría, en la pena, en las aspiraciones, en las ilusiones, en la esperanza, en el miedo... que une a toda la humanidad - los muertos a los vivos y los vivos a los no nacidos."[21]

Liberado de la rígida verosimilitud y desarrollándose a lo largo de milenios, el instinto creativo ha explorado ampliamente el rango emocional que marca la visión de Conrad del viaje artístico y proporciona la vernácula en la que la genuina realidad de Bellow nos susurra desde el principio. Los escritores, en particular, han creado mundo tras mundo de personajes cuyas vidas ficticias proporcionan estudios elevados sobre el compromiso humano. Odiseo y el tenso viaje de la venganza y la lealtad, Lady Macbeth y las garras de la ambición y la culpa, Holden Caulfield y el irrefrenable instinto rebelde, Atticus Finch y el poder del heroísmo silencioso pero inquebrantable, Emma Bovary y las tragedias de la conexión humana, Dorothy y el sinuoso camino del autodescubrimiento: las ideas que estas obras proporcionan sobre las variedades de la experiencia, las verdades artísticas que desarrollan, añaden sombra y dimensión a un bosquejo, por lo demás tosco, de la naturaleza humana.

Las obras visuales y auditivas, en las que el lenguaje no es central, proporcionan experiencias más impresionistas. Sin embargo, al igual que sus contrapartes literarias, si no más, pueden provocar las mismas emociones que, como describió Conrad, están más allá de la sabiduría; las voces que habitan la genuina realidad de Bellow nos hablan de diversas maneras. No puedo escuchar el *Totentanz* de Franz Liszt sin un presentimiento visceral; la Tercera Sinfonía de Brahms conjura un profundo e insaciable anhelo; la *Chacona de* Bach es una apoteosis de lo sublime; el "Himno a la Alegría" final de la Novena Sinfonía de Beethoven es para mí y, por supuesto, para gran parte del mundo también, una de las declaraciones más optimistas que la especie ha ofrecido jamás. Incluyendo la música con la letra, el "Aleluya" de Leonard Cohen alaba la vida imperfecta con una autenticidad incomparable; la simple y exquisita interpretación de Judy Garland de "Over the Rainbow" captura los puros anhelos de la juventud; "Imagine" de John Lennon encarna el simple poder de imaginar lo posible.

Como en los momentos puntuales de la vida, cada uno de nosotros puede traer a la mente obras, ya sea en literatura o cine, escultura o coreografía, pintura o música, que de una manera u otra nos han conmovido. A través de estas experiencias cautivadoras,

consumimos "megadosis" de cualidades esenciales de la vida humana en este planeta. Pero lejos de ser calorías vacías, estos encuentros intensos proporcionan conocimientos que serían difíciles, si no imposibles de adquirir de otra manera.

El letrista Yip Harburg, autor de muchos clásicos como "Over the Rainbow", lo dijo simplemente: "Las palabras te hacen pensar un pensamiento. La música te hace sentir un sentimiento. Pero una canción te hace sentir un pensamiento". [22] Sentir *un pensamiento.* Para mí, eso captura la esencia de la verdad artística. Como Harburg enfatizó, el pensamiento es intelectual, el sentimiento es emocional, pero "sentir un pensamiento es un proceso artístico". [23] Es una observación que se basa en la vinculación del lenguaje y la música pero, en realidad, yuxtapone las artes en general. Las respuestas emocionales provocadas por el arte se extienden a través de la reserva de pensamiento agitado que subyace a la conciencia. En las obras sin palabras, estas experiencias están menos dirigidas y los sentimientos son más abiertos. Pero todo el arte tiene la capacidad de hacernos sentir pensamientos, produciendo una variedad de verdades que difícilmente podríamos anticipar a partir de la deliberación consciente o el análisis de los hechos. Una variedad de verdades que de hecho están más allá de la sabiduría. Más allá de la pura razón. Más allá del alcance de la lógica. Más allá de la necesidad de pruebas.

No te equivoques. Todos *somos* bolsas de partículas, tanto de la mente como del cuerpo, y los hechos físicos sobre las partículas pueden abordar plenamente cómo interactúan y se comportan. Pero tales hechos, la narrativa de las partículas, sólo arrojan luz monocromática sobre las historias ricamente coloreadas de cómo los humanos navegamos por los complejos mundos del pensamiento, la percepción y la emoción. Y cuando nuestras percepciones mezclan el pensamiento y la emoción, cuando sentimos los pensamientos al mismo tiempo que los pensamos, nuestra experiencia va más allá de los límites de la explicación mecanicista. Ganamos acceso a mundos que de otra manera no estarían en los mapas. Como Proust enfatizó, esto debe ser celebrado. Sólo a través del arte, señaló, podemos entrar en el universo secreto de otro, el único viaje en el que realmente "volamos de estrella en estrella", un viaje que no puede ser navegado por "métodos directos y conscientes".[24]

Aunque se centra en las artes, la perspectiva de Proust resuena con mi propia visión de la física moderna. "El único viaje de descubrimiento verdadero", dijo una vez, "sería no visitar tierras extrañas sino poseer otros ojos, ver el universo a través de los ojos de otro, de cien otros". [25] Durante siglos, nosotros los físicos hemos confiado en las matemáticas y en los experimentos para reformar nuestros ojos, para revelar capas de realidad que no han sido tocadas por generaciones pasadas, para permitirnos ver paisajes familiares de nuevas y sorprendentes maneras. Con estas herramientas, hemos descubierto que las tierras más extrañas han surgido al examinar intensamente los mismos reinos que hemos habitado durante mucho tiempo. De todos modos, para adquirir estos conocimientos y utilizar el poder de la ciencia de manera más general, debemos seguir la inquebrantable directriz de mirar más allá de las peculiaridades de cómo cada una de nuestras distintas colecciones de moléculas y células toma el mundo, y de comprender las cualidades objetivas de la realidad. Por lo demás, las verdades demasiado humanas, nuestras historias anidadas se basan en el arte. Como dijo George Bernard Shaw, "Usas un espejo de vidrio para ver tu cara, usas obras de arte para ver tu alma".[26]

Inmortalidad poética

No es muy raro que me pregunten por el único hecho del universo que me parece más alucinante. No tengo una respuesta de stock. A veces sugiero la maleabilidad del tiempo de la relatividad. En otras ocasiones sugiero el entrelazamiento cuántico, lo que Einstein llamó "acción espeluznante a distancia". Pero a veces voy más simple y sugiero algo que la mayoría de nosotros encontramos por primera vez en la escuela. Cuando miramos al cielo nocturno vemos las estrellas como eran hace muchos miles de años. Usando poderosos telescopios, vemos objetos astronómicos mucho más distantes como eran hace millones o miles de millones de años. Algunas de estas fuentes astronómicas pueden haber muerto hace tiempo, y aún así continuamos viéndolas porque la luz que emitieron hace mucho tiempo sigue en tránsito. La luz proporciona una ilusión de presencia. Y no sólo para las estrellas. Los rayos de radiación reflejados y sin perturbar llevan su huella y la mía a través de una extensión arbitraria de espacio y tiempo, una poética inmortalidad que atraviesa el cosmos a la velocidad de la luz.

Aquí en la tierra, la inmortalidad poética toma una forma diferente. El anhelo de aferrarnos a la vida durante el tiempo que elijamos no ha sido correspondido, al menos no todavía y tal vez nunca lo sea. Pero la mente creativa, capaz de vagar libremente a través de mundos imaginarios, puede explorar lo inmortal, vagar a través de la eternidad, y meditar sobre por qué podríamos buscar o despreciar o temer un tiempo interminable. Durante milenios, los artistas han hecho precisamente eso. Hace unos 2500 años, el poeta lírico griego Safo se lamentaba de la inevitabilidad del cambio: "Vosotros, niños, perseguid los hermosos dones de las Musas cargadas de violetas / y la lira de tonos claros tan querida para el canto; / pero para mí, la vejez se ha apoderado ahora de mi otrora tierno cuerpo", matizado por la referencia al cuento de precaución de Tithonus, un mortal al que los dioses concedieron la inmortalidad pero que aún está sujeto a los estragos de la edad, ahora soportados por la eternidad. Una última línea que algunos estudiosos creen que es el verdadero final del poema -"Eros me ha concedido la belleza y el brillo del sol"- sugiere que a través de su apasionada búsqueda de la vida, expresada a través de su poesía, Safo se anticipó a trascender la decadencia y lograr un resplandor eterno; a través de su poesía, imaginó alcanzar una inmortalidad simbólica.[27]

Es una versión de un esquema de negación de la muerte en el que los mortales buscamos vivir a través de nuestros logros heroicos, contribuciones influyentes o trabajos creativos. La escala de tal inmortalidad requiere un ajuste antropocéntrico, desde la eternidad hasta la duración de la civilización -un costo significativo, pero compensado por el reconocimiento de que, a diferencia de su contraparte literal, la versión simbólica de la inmortalidad es real. La única cuestión es la de la estrategia. ¿Qué vidas serán recordadas? ¿Qué obras perdurarán? ¿Y cómo asegurar que nuestras vidas y nuestras obras estarán entre ellas?

Un par de milenios después de Safo, Shakespeare contempló el papel del arte y del artista en la formación de lo que el mundo recuerda. Abordando el tema de un epitafio que

imagina componiendo, Shakespeare señala, "Cuando todos los respiradores de este mundo estén muertos / Aún vivirás, tal virtud tiene mi pluma", un beneficio, afirma Shakespeare, que él mismo no disfrutará: "Tu nombre de aquí la vida inmortal tendrá / Aunque yo, una vez ido, a todo el mundo debe morir." Por supuesto, estamos en el juego de Shakespeare: como son las palabras del poeta las que se leerán y recitarán, el tema del epitafio no es más que un vehículo para que el poeta alcance la inmortalidad, aunque sea simbólicamente. De hecho, siglos después, es Shakespeare quien sigue viviendo.

Después de dejar el Círculo de Viena de Freud, Otto Rank desarrolló su tesis de que la búsqueda de la inmortalidad simbólica es un motor primario del comportamiento humano. En opinión de Rank, el impulso artístico refleja la mente haciéndose cargo de su destino, teniendo el coraje de rehacer la realidad, y embarcándose en el proyecto de toda la vida de dar forma a su propio yo idiosincrásico. El artista se mueve hacia la salud psíquica aceptando la mortalidad - vamos a morir, eso es todo, superarlo - y cambiando el impulso de la eternidad a una forma simbólica llevada por los trabajos creativos. Esta perspectiva proyecta la imagen cliché del artista torturado bajo una luz diferente. Según Rank, hacer frente a la mortalidad a través de la creación de arte es un camino hacia la cordura. O, como el escritor y crítico Joseph Wood Krutch describió de manera similar, "El hombre necesita la eternidad, como lo atestigua toda la historia de sus aspiraciones; pero la eternidad del arte es, con toda probabilidad, la única que obtendrá".[28]

¿Podría esta dinámica haber estado en funcionamiento hace decenas de miles de años, arrojando luz sobre por qué desviamos la energía a actividades que se apartan de las necesidades inmediatas de sustento y refugio? ¿Podría explicar por qué, a través de milenios, las actividades artísticas han permanecido como hilos centrales en el tejido de todas las culturas humanas? Sí y sí. Tanto si la visión global de Rank da en el blanco como si no, podemos imaginarnos a nuestros antiguos antepasados sintiendo su propia naturaleza mortal, anhelando aferrarse a su mundo y estamparlo con algo icónico, algo de autoría propia, algo duradero. Podemos imaginarnos ese impulso interrumpiendo un enfoque diligente en la supervivencia y, con el tiempo, siendo reforzado y refinado por el placer común de unirse al artista en mundos imaginativos surgidos de la mente humana.

Mientras que la escasez de pruebas reduce el análisis de nuestro pasado lejano a conjeturas informadas, aquí en la era moderna nos encontramos con una obra tras otra reflexionando profundamente sobre la mortalidad y la eternidad. [29] Walt Whitman reflexionó sobre la intolerancia de concederle una finalidad a la muerte: "¿Sospecha usted de la muerte? Si sospechara de la muerte, debería morir ahora. / ¿Crees que podría caminar agradablemente y bien hacia la aniquilación?... / ¡Juro que creo que no hay nada más que la inmortalidad!" Para William Butler Yeats, la antigua ciudad de Bizancio era un destino donde podría ser liberado de su forma física moribunda, liberado de las preocupaciones humanas, y dado permiso para entrar en un reino atemporal: "Consume mi corazón, enfermo de deseo / y atado a un animal moribundo / no sabe lo que es; y reúneme / en el artificio de la eternidad." [30] Herman Melville dejó claro que la mortalidad navega con nosotros incluso cuando las aguas bravas parecen haber bajado: "Todos nacen con cabestro alrededor de sus cuellos; pero sólo cuando son atrapados en el rápido y repentino giro de la muerte, los mortales se dan cuenta de los silenciosos, sutiles y siempre presentes peligros

de la vida." [31] Edgar Allan Poe llevó la negación de la muerte a un extremo literario dando voz a las víctimas de entierro prematuro luchando contra el abrazo más íntimo de la muerte: "Grité con horror: Me clavé las uñas en los muslos y los herí; el ataúd estaba empapado en mi sangre; y al desgarrar los lados de madera de mi prisión con el mismo sentimiento maníaco me laceré los dedos y me puse las uñas a la rápida, quedando pronto inmóvil por el agotamiento." [32] Tennessee Williams, a través del patriarca ficticio Big Daddy Pollitt, señaló que "la ignorancia -de la mortalidad- es un consuelo. Un hombre no tiene ese consuelo, es el único ser vivo que concibe la muerte," y en consecuencia, "si tiene dinero compra y compra y compra y creo que la razón por la que compra todo lo que puede comprar es que en el fondo de su mente tiene la loca esperanza de que una de sus compras será la vida eterna!"[33]

Dostoievski, a través de su personaje Arkády Svidrigáylov, transmitió una perspectiva diferente, cansado de la reverencia comandada por la eternidad: "La eternidad se nos presenta siempre como una idea que no podemos captar, como algo enorme, ¡enorme! ¿Por qué tiene que ser enorme? De repente, en lugar de todo eso, imagina que habrá una pequeña habitación, algo así como una casa de baños en el campo, con hollín, con arañas en todos los rincones, y eso es toda la eternidad. Sabes, a veces lo imagino así." [34] Es un sentimiento expresado también por Sylvia Plath, "Oh Dios, no soy como tú / En tu negro vacío / Estrellas pegadas por todas partes, confeti brillante y estúpido / La eternidad me aburre, nunca lo quise", [35] y recogido con ligereza por Douglas Adams a través de su inmortal accidental, Wowbagger el Infinitamente Prolongado, que planea hacer frente a su profundo aburrimiento insultando sistemáticamente a todos en el universo, uno por uno, en orden alfabético.[36]

Esta gama de disposiciones, desde el anhelo hasta el desdén, demuestra el punto más grande: nuestro reconocimiento del tiempo limitado que se nos asigna ha impulsado un compromiso artísticamente vibrante con el concepto de la eternidad. La vida examinada examina la muerte. Y para algunos, examinar la muerte es liberar la imaginación para desafiar su dominio, disputar su eminencia y conjurar reinos que están fuera de su alcance. Por mucho que los investigadores discutan intensamente sobre su utilidad evolutiva, su papel en la construcción de la cohesión social, su necesidad de pensamiento innovador y su posición en el panteón de los impulsos primarios, las artes proporcionan nuestros medios más evocadores para dar expresión a las cosas que consideramos más importantes, y entre ellas están la vida y la muerte, lo finito y lo infinito.

Para muchos, incluyéndome a mí, la más concentrada de esas expresiones es la música. La música puede ofrecer una inmersión tan envolvente que en sólo unos breves momentos se siente como si hubiéramos ido más allá del tiempo. El violonchelista y director Pablo Casals describió el poder de la música para "informar las actividades ordinarias con fervor espiritual, para dar alas de eternidad a lo más efímero". [37] Es un fervor que nos hace sentir parte de algo más grande, algo que afirma visceralmente la "invencible convicción de solidaridad de Conrad que une la soledad de innumerables corazones". [38] Ya sea con el compositor o con los oyentes, o a través de una comunión más abstracta en conjunto, la

música invita a la conexión. Y es a través de tal conexión que la experiencia de la música trasciende el tiempo.

A finales de los años 60, se pidió a los alumnos de tercer grado de la clase de la Sra. Gerber en la escuela secundaria 87 de Manhattan que entrevistaran a un adulto de su elección y escribieran un breve informe explicando la ocupación del entrevistado. Tomé el camino más fácil y entrevisté a mi padre, un compositor e intérprete al que le gustaba citar su imprimatur académico, un "SPhD" (desertor de la Escuela Secundaria de Seward Park). A mitad del décimo grado, mi padre dejó los libros y se fue a la carretera, cantando, tocando y actuando por todo el país. Ha pasado más de medio siglo desde esa tarea de la escuela primaria, pero una cosa que mencionó nunca me ha dejado. Cuando le pregunté por qué eligió la música, mi padre respondió: "Para alejar la soledad". Rápidamente hizo la transición a un tono más brillante, más adecuado para un informe de tercer grado, pero ese momento sin censura fue revelador. La música era su salvavidas. Era su versión de la solidaridad de Conrad.

Pocos compositores mueven el mundo. Mi padre no estaba entre ellos, una dolorosa comprensión que poco a poco fue aceptando. Las melodías y ritmos escritos a mano a través de cientos de páginas amarillas del manuscrito, muchas de ellas de antes de que yo naciera, ahora son de poco interés para cualquiera que no sea de la familia. Soy quizás la única persona que queda que, de vez en cuando, todavía escucha las baladas y canciones y las obras para piano que compuso en los años 40 y 50. Para mí, estas composiciones son un tesoro, una conexión que me permite sentir los pensamientos de mi padre de una época en la que apenas empezaba a abrirse camino en el mundo.

La música tiene el notable poder de crear una conexión tan profunda incluso entre aquellos que no están vinculados a la familia, que viven en diferentes tiempos, que habitan en diferentes reinos. Una descripción conmovedora viene de Helen Keller, una de las heroínas singulares de la historia. El 1 de febrero de 1924, la emisora de radio WEAF de Nueva York transmitió la interpretación en directo de la Novena Sinfonía de Beethoven por la Orquesta Sinfónica de Nueva York. En su casa, Helen Keller colocó sus manos en el diafragma de un altavoz de radio descubierto y a través de las vibraciones fue capaz de sentir la música, de experimentar lo que ella llamó la "sinfonía inmortal", incluso de distinguir instrumentos individuales. "Cuando la voz humana saltó de la oleada de armonía, los reconocí instantáneamente como voces. Sentí que el coro se volvió más exultante, más extático, más rápido y en llamas, hasta que mi corazón casi se detuvo." Y entonces, hablando con sonidos que tocan el espíritu, música que reverbera a la eternidad, concluye:

> Mientras escuchaba, con la oscuridad y la melodía, la sombra y el sonido llenando toda la habitación, no pude evitar recordar que el gran compositor que derramó tal inundación de dulzura en el mundo era sordo como yo. Me maravilló el poder de su espíritu insaciable por el que, a partir de su dolor, obró con tanta alegría por los demás, y allí me senté, sintiendo con mi mano la magnífica sinfonía que se rompió como un mar en las silenciosas orillas de su alma y la mía.[39]

9

DURACIÓN E IMPERMANENCIA

Desde lo sublime hasta el pensamiento final

Cada cultura tiene una noción de lo intemporal, una representación venerada de la permanencia. Almas inmortales, historias sagradas, dioses ilimitados, leyes eternas, arte trascendente, teoremas matemáticos. Sin embargo, abarcando categorías desde lo sobrenatural hasta lo completamente abstracto, la permanencia es algo que los humanos codiciamos pero nunca alcanzamos. Lo más cercano que estamos, una sensación de que el tiempo se ha ido, ya sea el resultado de un encuentro eufórico o trágico, una inducción meditativa o química, una experiencia religiosa o artística exaltada, puede proporcionar las experiencias más formativas de la vida.

Hace décadas, junto con otros ocho adolescentes, estaba en un curso de supervivencia en los profundos bosques de Vermont. Una noche, después de que todos durmiéramos en nuestras tiendas, los líderes del curso nos gritaron que nos levantáramos y nos vistiéramos rápidamente. Nos dirigíamos a una improvisada caminata nocturna. Tomados de la mano y caminando en fila india a través de la oscuridad, lentamente atravesamos el denso bosque, la espesa maleza y, lo que es especialmente agradable, un pantano de barro hasta la cintura. Mojados, congelados y cubiertos de mugre, fuimos finalmente conducidos a un claro cercano donde, según nos informaron, los nueve nos quedaríamos por la noche con nada más que tres sacos de dormir. Dándonos cuenta de la inutilidad de nuestras protestas, por muy intensas que fueran, juntamos los sacos de dormir, los desnudamos y nos acurrucamos bajo el improvisado edredón. Muchos maldijeron, otros juraron dejar el curso antes de tiempo, unos pocos lloraron. Pero luego estaba el espectáculo más maravilloso. Una brillante aurora boreal llenaba el cielo nocturno. Nunca había visto nada parecido. Los hilos de luz en espiral, los impresionantes colores sangrando unos a otros, todo ello con un telón de fondo de estrellas aparentemente interminables e incontables. De repente, estaba en un lugar diferente. La caminata, el pantano, el frío, el acurrucamiento casi desnudo, todo era ahora parte de un retroceso primordial. El hombre, la naturaleza, el universo. Mientras vestía la tierra, me envolvían las luces danzantes. Abandonado por el último de nuestros calores comunes, fui absorbido por las estrellas distantes. Perdí la noción de cuánto tiempo

miraba al cielo antes de dormirme, ya sea minutos u horas. La duración no importaba. Por un breve momento, el tiempo se había disuelto.

Los episodios con esta cualidad atemporal son raros. Y son fugaces. El tiempo, en su mayor parte, es un compañero constante. La impermanencia subyace a la experiencia. Veneramos lo absoluto pero estamos atados a lo transitorio. Incluso aquellos rasgos del cosmos que pueden presentarse como duraderos, la extensión del espacio, las galaxias distantes, la materia, todos están al alcance del tiempo. Como exploraremos en este capítulo y en el siguiente, por muy estable que parezca, el universo y todo lo que contiene es mutable y precario.

La evolución, la entropía y el futuro

Debajo de la firme fachada de la realidad, la ciencia ha revelado un drama implacable de partículas agitadas en el que es tentador presentar a la evolución y la entropía como personajes en conflicto que luchan perpetuamente por el control. El cuento prevé que la evolución construye la estructura mientras que la entropía la destruye. Es una historia ordenada, pero el problema, como hemos visto en capítulos anteriores, es que no es del todo cierto. Como muchos esbozos simplificados, hay algo de verdad en ello. La evolución *es* instrumental en la construcción de la estructura. La entropía *tiende* a degradar la estructura. Pero la entropía y la evolución no tienen por qué tirar en direcciones opuestas. El doble paso de la entropía permite que la estructura florezca aquí, siempre y cuando la entropía sea expulsada allí. La vida, entre los principales logros de la evolución, encarna este mecanismo, consumiendo energía de alta calidad, utilizándola para mantener y mejorar sus disposiciones ordenadas, y expulsando residuos de alta entropía al medio ambiente. A lo largo de miles de millones de años, el intercambio cooperativo entre la entropía y la evolución ha dado como resultado arreglos de partículas que son exquisitos, incluyendo una vida y una mente capaces de producir la Novena Sinfonía y muchas más vidas y mentes capaces de experimentarla como sublime.

A medida que nos desviamos del viaje que nos ha llevado del Big Bang a Beethoven y nos dirigimos hacia el futuro, ¿seguirán siendo la evolución y la entropía factores decisivos que guíen el cambio? Para la evolución darwiniana, podrías pensar que la respuesta es no. [1] La dependencia del éxito reproductivo de la composición genética es la razón por la que la selección darwiniana ha dirigido durante mucho tiempo la nave de la evolución. Una diferencia consecuente de los últimos tiempos es la intervención de la medicina moderna y las protecciones proporcionadas por la civilización en general. Los genotipos que podrían haber encontrado desafiante la vida en la antigua sabana africana pueden funcionar muy bien en la actual ciudad de Nueva York. En muchas partes del mundo, su perfil genético ya no es el factor dominante que determina si se muere de niño o si se tiene una progenie abundante de adulto. Por supuesto, al nivelar las secciones del campo de juego genético, los

avances modernos ajustan las presiones de selección anteriores y así ejercen su propia variedad de influencia evolutiva. Los investigadores también señalan numerosas presiones, como las elecciones dietéticas (por ejemplo, las dietas ricas en productos lácteos favorecen los sistemas digestivos en los que la producción de lactasa se prolonga más allá de la infancia), las condiciones ambientales (por ejemplo, vivir a gran altitud da ventaja a las adaptaciones para sobrevivir con menos oxígeno disponible) y las preferencias de pareja (por ejemplo, las alturas medias en algunos países pueden estar evolucionando hacia estaturas consideradas más atractivas por los que son reproductivamente activos) que impulsan las tendencias en el fondo genético. [2] Pero el mayor impacto de todos puede venir de la recién descubierta capacidad de editar directamente los perfiles genéticos. Las técnicas de rápido avance tienen la capacidad de aumentar los mecanismos de variación genética, mutación aleatoria y mezcla sexual, para incluir el diseño volitivo. Si un investigador descubre una reconfiguración genética que prolongue la vida humana a doscientos años con efectos secundarios como piel de cian, estatura de diez pies y una libido voraz centrada en el azul, la evolución se mostrará plenamente como un grupo auto-seleccionado de humanos longevos, como los Na'vi-se extienden rápidamente. Con el potencial de remodelar completamente la vida y quizás diseñar una versión de la sensibilidad, ya sea biológica, artificial o alguna variedad de híbrido, cuyos poderes pueden empequeñecer nuestras habilidades actuales, cualquiera puede adivinar a dónde nos llevará todo esto.

Para la entropía, la respuesta a la pregunta de relevancia futura es ciertamente sí. Hace muchos capítulos encontramos que la segunda ley de la termodinámica es una consecuencia general de la aplicación del razonamiento estadístico a las leyes físicas subyacentes. ¿Podrían los futuros descubrimientos revisar las leyes que ahora consideramos fundamentales? Casi con toda seguridad. ¿Mantendrán la entropía y la segunda ley su lugar de prominencia explicativa? También es casi seguro. Durante la transición del marco cuántico clásico al radicalmente diferente, las matemáticas que describen la entropía y la segunda ley requirieron una actualización, pero debido a que estos conceptos emergen del razonamiento probabilístico más básico, continúan aplicándose de todos modos. Anticipamos que lo mismo ocurrirá independientemente de los futuros desarrollos en nuestra comprensión de la ley física. No es que seamos incapaces de imaginar leyes físicas que den lugar a la entropía y a que la segunda ley sea irrelevante, pero las leyes tendrían que ser tan contrarias a las características de la realidad inherentes a todo lo que conocemos y todo lo que hemos medido que la mayoría de los físicos descartan de plano la posibilidad.

En la visión del futuro, una mayor incertidumbre rodea el control que nosotros o alguna inteligencia próxima podrá ejercer sobre nuestro entorno. ¿Podría la vida inteligente dirigir el destino a largo plazo de las estrellas, galaxias e incluso el cosmos en su conjunto? ¿Podría tal inteligencia cambiar intencionalmente la entropía en escalas voluminosas, conduciendo efectivamente la entropía hacia abajo en enormes franjas del espacio, una versión a escala cósmica de los dos pasos entrópicos? ¿Podría tal inteligencia incluso tener la capacidad de diseñar y crear universos enteramente nuevos? Por muy descabelladas que parezcan estas actividades, entran dentro del ámbito de lo posible. El dilema para nosotros es que su impacto en el futuro está totalmente más allá de nuestra capacidad de predicción.

Incluso en un mundo legal, uno que carece de libre albedrío tradicional, el amplio repertorio de comportamiento de la inteligencia -la versión de libertad que adquiere la inteligencia- hace que ciertas variedades de predicción sean esencialmente imposibles. El pensamiento futuro sin duda adquirirá métodos y tecnologías de computación incomparables, pero sospecho que predecir los desarrollos a largo plazo que son íntimamente dependientes de la vida y la inteligencia permanecerá fuera de nuestro alcance.

¿Cómo, entonces, proceder?

Asumiremos que las leyes de la física tal como se conocen actualmente, operando de la manera no dirigida que presumiblemente tienen desde el big bang, serán la influencia dominante que guíe el desarrollo cósmico. No consideraremos la posibilidad de que las propias leyes o incluso las "constantes" numéricas de la naturaleza puedan cambiar. Tampoco consideraremos la posibilidad de que estas leyes o constantes ya estén cambiando lentamente, modificaciones que actualmente podrían ser demasiado pequeñas como para dejar una marca, pero que podrían existir y podrían acumularse a lo largo de vastas escalas de tiempo en un cambio sustancial. [3] Tampoco consideraremos la posibilidad de que el dominio sobre el que la inteligencia futura ejercerá el control estructural se extienda a las escalas de las galaxias y más allá. Concedido, eso es un montón de "no" y "nors". Pero en ausencia de cualquier evidencia que nos guíe, investigar estas posibilidades equivaldría a disparar en la oscuridad. Si estas suposiciones van en contra de sus expectativas para el futuro, puede ver el relato en este y el siguiente capítulo como un reflejo de los desarrollos cosmológicos que de otra manera ocurrirían en ausencia de tal cambio o intervención inteligente. Mi sospecha es que la claridad que aportan los futuros descubrimientos, así como las influencias ejercidas por la inteligencia futura, si bien son seguramente relevantes para los detalles del relato que sigue, no requerirán una reescritura completa del desarrollo cósmico que estudiaremos. [4] Una suposición audaz, quizás, pero es la ruta más expeditiva hacia adelante y la que ahora perseguiremos audazmente.[5]

Como se verá en las páginas siguientes, el hecho mismo de que podamos elaborar un relato convincente, aunque provisional, que delinee el despliegue cósmico exponencialmente hacia el futuro es un logro extraordinario, moldeado por las manos de muchos y tan emblemático del anhelo humano de coherencia como las historias, los mitos, las religiones y las creaciones artísticas más apreciadas de nuestra especie.

Un Imperio del Tiempo

¿Cómo deberíamos organizar nuestro pensamiento sobre el futuro? La intuición humana es razonablemente adecuada para captar las escalas de tiempo de la experiencia común, pero al analizar las épocas cosmológicas clave del futuro entraremos en reinos temporales tan vastos que incluso nuestras mejores analogías no pueden proporcionar más que un indicio de las duraciones involucradas. Aún así, no hay mejor manera que las analogías basadas en escalas familiares para proporcionar puntos de apoyo mental para una escalada tan poco familiar, así que imaginemos que la línea temporal del universo se extiende hasta el Empire State Building, con cada piso representando una duración diez veces mayor que la anterior. El primer piso representa diez años desde el big bang, el segundo piso cien años, el tercero

mil años, y así sucesivamente. Como los números lo demuestran, las duraciones crecen rápidamente a medida que subimos de piso en piso - simple de describir, pero fácil de malinterpretar. Caminar, digamos, del piso 12 al piso 13 equivale a considerar el universo desde un billón de años después del big bang hasta diez billones de años después del bang. Al ascender ese único piso, transcurren nueve billones de años, empequeñeciendo toda la duración representada por todos los pisos anteriores. El mismo patrón se mantiene a medida que continuamos ascendiendo: la duración representada por cada piso subsiguiente es mucho mayor, exponencialmente mayor, que la duración representada por los pisos de abajo.

Con una vida humana de unos cien años, imperios duraderos de unos mil años, especies resistentes que se mantienen durante millones de años, los pisos cada vez más altos del Empire State Building representan duraciones de un tipo completamente distinto, aparentemente eónico. Cuando lleguemos a la plataforma de observación del Empire State Building en el piso 86, estaremos a ^{1086} años-100.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000- del big bang, una escala de tiempo asombrosa que se eleva a cualquier duración de cualquier relevancia para cualquier esfuerzo humano. Y sin embargo, a pesar de todos los ceros, cuando posteriormente pasemos al rellano más alto del edificio, alcanzando el piso 102, la duración representada por la plataforma de observación será, en comparación, mucho menor que el grosor de la capa de pintura de esa última pisada.

Hoy en día, han pasado unos 13.800 millones de años desde el big bang, lo que significa que todos los desarrollos discutidos en los capítulos anteriores están esparcidos entre la planta baja del Empire State Building y unos pocos pasos por encima del piso 10. Desde aquí nos dirigimos exponencialmente lejos en el futuro.

Subamos.

El Sol Negro

Nuestros primeros antepasados, incluso sin entender que el sol baña la tierra en un continuo lavado de energía de baja entropía esencial para la vida, reconocieron la importancia central del ojo vigilante del cielo, una presencia ardiente que supervisa las idas y venidas de la existencia diaria. Al ponerse el sol, se dieron cuenta de que volvería a salir, habiendo inducido el patrón más conspicuo y fiable del mundo. Pero con la misma fiabilidad, ese ritmo terminará algún día.

Durante casi cinco mil millones de años, el sol ha soportado su tremenda masa contra la fuerza aplastante de la gravedad a través de la energía producida por la fusión de los núcleos de hidrógeno en su núcleo. Esa energía impulsa un frenético entorno de partículas de movimiento rápido que ejercen una fuerte presión hacia afuera. Y al igual que la presión producida por una bomba de aire que sostiene el castillo inflable de un niño, la presión producida por la fusión en el núcleo del sol sostiene el sol, evitando que se colapse por su propio peso. Este punto muerto entre la gravedad que tira hacia adentro y las partículas que

empujan hacia afuera se mantendrá firme durante otros cinco mil millones de años. Pero entonces el equilibrio se invertirá. Aunque el Sol seguirá estando lleno de núcleos de hidrógeno, apenas habrá alguno en el núcleo. La fusión de hidrógeno produce helio, núcleos que son más pesados y densos que el hidrógeno, y así como la arena vertida en un estanque desplaza el agua a medida que llena el fondo del estanque, el helio desplaza el hidrógeno a medida que llena el centro del sol.

Eso es algo importante.

El centro del sol es donde se encuentran sus temperaturas más calientes, actualmente alrededor de quince millones de grados, muy por encima de los diez millones de grados requeridos para fusionar el hidrógeno en el helio. Pero para fusionar los núcleos de helio se requiere una temperatura de unos cien millones de grados. Debido a que la temperatura del sol no está cerca de ese umbral, a medida que el helio desplaza al hidrógeno en el núcleo, el suministro de combustible para la fusión disminuirá. La presión exterior de la producción de energía de la fusión en el núcleo disminuirá, y en consecuencia la atracción interior de la gravedad ganará terreno. El Sol comenzará a implosionar. A medida que su espectacular peso colapse hacia adentro, la temperatura del sol se disparará. El intenso calor y la presión, aún lejos de las condiciones necesarias para que el helio empiece a arder, provocarán una nueva ronda de fusión dentro de una delgada capa de núcleos de hidrógeno que rodea el núcleo de helio. Y con tales condiciones extremas, la fusión de hidrógeno procederá a un ritmo extraordinario, produciendo un empuje hacia afuera más intenso que el que el sol ha experimentado nunca, no sólo deteniendo la implosión sino empujando al sol a hincharse tremendamente.

El destino de los planetas interiores depende del equilibrio entre dos factores. ¿Qué tamaño tendrá el Sol? Y a medida que lo haga, ¿cuánta masa se desprenderá del sol? Esta última pregunta es relevante porque con su motor nuclear funcionando en sobremarcha, las copiosas partículas de la capa exterior del sol serán lanzadas constantemente al espacio. Un sol de menor masa, a su vez, resulta en una disminución de la atracción gravitatoria general, causando que los planetas migren a órbitas más distantes. El futuro de cualquier planeta depende de si su trayectoria de retroceso puede superar la del sol en expansión.

Simulaciones por computadora que incorporan modelos solares detallados concluyen que Mercurio perderá la carrera y será tragado por el sol distendido, vaporizándose rápidamente. Marte, que orbita a una distancia mayor, disfruta de una ventaja y estará a salvo. Es probable que Venus esté acabado, sin embargo, algunas simulaciones concluyen que el sol hinchado puede caer justo antes de alcanzar su órbita de retroceso y, si es así, la de la Tierra también. [6] Pero incluso si la Tierra se salva, las condiciones aquí cambiarán profundamente. La temperatura de la superficie de la Tierra se elevará a miles de grados, lo suficientemente caliente como para secar los océanos, expulsar la atmósfera e inundar la superficie con lava fundida. Condiciones desagradables, por supuesto, pero el gigantesco sol rojo que se extiende por el cielo sería un espectáculo para contemplar. Es virtualmente seguro, sin embargo, que es una vista que nadie verá nunca. Si nuestros descendientes continúan prosperando (habiendo esquivado con éxito la autodestrucción, los patógenos letales, los desastres medioambientales, los asteroides mortales y las invasiones alienígenas,

entre otras catástrofes potenciales), y si pretenden seguir haciéndolo, habrán abandonado la Tierra hace mucho tiempo en busca de un hogar más hospitalario.

A medida que los núcleos de hidrógeno que rodean el núcleo de helio del sol continúan fusionándose, el helio adicional que producen lloverá, obligando al núcleo a contraerse aún más y propulsando su temperatura aún más alta. A su vez, la mayor temperatura acelerará el ciclo, aumentando la velocidad de fusión del hidrógeno en la capa circundante, intensificando la tormenta de helio que golpea el núcleo, e impulsando la temperatura aún más alta. Dentro de unos cinco mil quinientos millones de años, la temperatura del núcleo será finalmente lo suficientemente caliente como para soportar la quema nuclear de helio, produciendo carbono y oxígeno. Después de una espectacular pero momentánea erupción que marca la transición a la fusión del helio, siendo la fuente de energía dominante del sol, éste se reducirá de tamaño y se asentará en una configuración menos frenética.

Pero la recién descubierta estabilidad tendrá una duración relativamente corta. En unos cien millones de años, de la misma manera que el helio más pesado desplazó al hidrógeno más ligero, el carbono y el oxígeno más pesados harán lo mismo con el helio más ligero, apoderándose del núcleo solar y forzando al helio a entrar en las capas circundantes. La quema nuclear de los nuevos componentes del núcleo, el carbono y el oxígeno, requiere temperaturas aún más altas, un mínimo de seiscientos millones de grados. Como la temperatura del núcleo del sol es mucho menor, la fusión nuclear se detendrá una vez más, la atracción de la gravedad hacia el interior volverá a dominar, el sol se contraerá una vez más y la temperatura del núcleo aumentará una vez más.

En la fase anterior de este ciclo, el aumento de la temperatura provocó el inicio de la fusión en una capa de hidrógeno que rodea el núcleo quieto del helio. Ahora el aumento de la temperatura provoca la fusión en una capa de helio que rodea un núcleo quieto de carbono y oxígeno. Pero en esta vuelta la temperatura en el núcleo nunca alcanzará el valor requerido para que la combustión nuclear se vuelva a encender allí. La masa del sol es demasiado baja para proporcionar el necesario aplastamiento propulsor de temperatura que, en estrellas más grandes, encendería la fusión del carbono y el oxígeno en núcleos aún más pesados y complejos. En cambio, a medida que la capa de helio se quema, bañando el núcleo con carbono y oxígeno recién hechos, el núcleo continuará contrayéndose hasta que un proceso cuántico, llamado el principio *de exclusión de Pauli, detenga* la implosión.[7]

En 1925, el físico austríaco Wolfgang Pauli, un famoso pionero cuántico cáustico ("No me importa que pienses despacio; me importa que publiques más rápido de lo que piensas" [8]), se dio cuenta de que la mecánica cuántica pone un límite a lo cerca que pueden estar dos electrones juntos (más precisamente, la mecánica cuántica excluye que dos partículas de materia idénticas cualesquiera ocupen un estado cuántico idéntico, pero la descripción aproximada será suficiente). Poco después, las ideas colectivas de varios investigadores mostraron que el resultado de Pauli, a pesar de que se centraba en partículas diminutas, era la clave para comprender el destino del sol, así como el destino de todas las estrellas de tamaño similar. A medida que el sol se contrae, los electrones del núcleo se empaquetan cada vez más estrechamente, asegurando que tarde o temprano la densidad de electrones alcanzará el límite especificado por el resultado de Pauli. Cuando una mayor contracción violaría el principio de Pauli, se produce una poderosa repulsión cuántica, los electrones se

mantienen firmes, demandan su espacio personal y se niegan a ser empaquetados más estrechamente. La contracción del sol se detiene.[9]

Lejos del núcleo, las capas externas del sol continuarán expandiéndose y enfriándose, y finalmente se irán a la deriva hacia el espacio, dejando atrás una bola asombrosamente densa de carbono y oxígeno, llamada estrella enana blanca, que continuará brillando durante un puñado de miles de millones de años más. Sin la temperatura necesaria para una mayor fusión nuclear, la energía térmica se disipará lentamente en el espacio y, como el brillo final de una brasa ardiente, el sol remanente se enfriará y se oscurecerá, pasando finalmente a una esfera congelada y oscura. Unos pocos pasos por encima del décimo piso, el sol se desvanecerá en negro.

Es un final suave. Más aún si lo comparamos con un desenlace cataclísmico que puede estar esperando todo el universo mientras continuamos nuestra subida al siguiente piso.

El Gran Desgarramiento

Lanza una manzana hacia arriba y el implacable tirón de la gravedad de la Tierra asegura que su velocidad disminuya constantemente. Es un ejercicio peatonal con un profundo significado cosmológico. Desde las observaciones de Edwin Hubble en los años 20, sabemos que el espacio se está expandiendo: las galaxias se están alejando unas de otras.[10] Pero al igual que con la manzana lanzada, la atracción gravitatoria de cada galaxia sobre las demás debe, seguramente, estar frenando el éxodo cósmico. El espacio se está expandiendo, pero la tasa de expansión debe estar disminuyendo. En los años 90, motivados por esta expectativa, dos equipos de astrónomos se propusieron medir la tasa de desaceleración cósmica. Después de casi una década de búsqueda, anunciaron sus resultados y sacudieron el mundo científico.[11] Las expectativas eran erróneas. A través de minuciosas observaciones de las distantes explosiones de supernovas, potentes faros que pueden verse y medirse claramente a través del cosmos, descubrieron que la expansión no se está ralentizando. Se está acelerando. Y no es que el cambio a la sobremarcha cósmica haya ocurrido ayer. Los investigadores, cayéndose de sus sillas, se enfrentaron a observaciones astronómicas que establecían que la expansión ha estado acelerándose durante los últimos cinco mil millones de años.

La expectativa generalizada de una disminución de la tasa de expansión se ha mantenido porque tiene sentido. Proponer una expansión acelerada del espacio es, a primera vista, tan absurdo como predecir que una manzana lanzada suavemente dejará su mano y su cohete en el cielo. Si vieras algo tan extraño, buscarías una fuerza oculta, una influencia olvidada responsable de empujar la manzana hacia arriba. Del mismo modo, cuando los datos proporcionaron pruebas abrumadoras de que la expansión espacial se está acelerando, los investigadores se levantaron del suelo, agarraron puñados de tiza y buscaron la causa.

La explicación principal invoca un rasgo fundamental de la relatividad general de Einstein que encontramos en nuestra discusión de la cosmología inflacionaria en el capítulo 3.[12] Recordemos que según Newton y Einstein, los grupos de materia como planetas y estrellas

ejercen la conocida gravedad atractiva, pero en el enfoque de Einstein el repertorio de la gravedad se amplía. Si una región del espacio no alberga un cúmulo, sino que está uniformemente llena de un campo de energía -mi imagen preferida, introducida anteriormente, es el vapor llenando uniformemente una sauna- la fuerza gravitatoria resultante es repulsiva. En la cosmología inflacionaria, los investigadores prevén que esa energía es transportada por una especie exótica de campo (el campo de inflado), y la teoría propone que su poderosa gravedad repulsiva impulsó el big bang. Aunque ese acontecimiento ocurrió hace casi catorce mil millones de años, podemos seguir un enfoque análogo para explicar la acelerada expansión del espacio que observamos actualmente.

Si imaginamos que todo el espacio está uniformemente lleno de otro campo de energía -lo llamamos *energía oscura* porque no genera luz, pero *la energía invisible sería igual* de apta- podemos dar cuenta de por qué las galaxias están saliendo a toda prisa. Siendo grupos de materia, las galaxias ejercen una gravedad atractiva, atrayéndose mutuamente hacia el interior y frenando así el éxodo cósmico. Al estar distribuida uniformemente, la energía oscura ejerce una gravedad repulsiva, empujando hacia fuera y acelerando así el éxodo cósmico. Para explicar la expansión acelerada que observan los astrónomos, el empuje de la energía oscura simplemente necesita superar el tirón colectivo de las galaxias. Y no por mucho. Comparado con la abrasadora hinchazón del espacio durante el Big Bang, la expansión de hoy es suave, y por lo tanto una diminuta energía oscura es todo lo que se necesita. De hecho, en un típico metro cúbico de espacio, la cantidad de energía oscura necesaria para alimentar la velocidad galáctica observada mantendría una bombilla de cien vatios funcionando durante unas cinco billonésimas de segundo, casi cómicamente diminuta. [13] Pero el espacio contiene muchos metros cúbicos. El empuje repulsivo aportado por todos y cada uno se combina para producir una fuerza externa capaz de impulsar la expansión acelerada medida por los astrónomos.

El caso de la energía oscura es convincente pero circunstancial. Nadie ha encontrado una manera de agarrar la energía oscura, establecer su existencia y examinar directamente sus propiedades. Sin embargo, debido a que explica tan hábilmente las observaciones, la energía oscura se ha convertido en la explicación de facto de la expansión acelerada del espacio. Menos claro, sin embargo, es el comportamiento a largo plazo de la energía oscura. Y para predecir el futuro lejano, es esencial pensar en las posibilidades. El comportamiento más simple consistente con todas las observaciones es que el valor de la energía oscura no cambia en el curso del tiempo cósmico. [14] Pero la simplicidad, si bien es favorecida conceptualmente, no tiene ninguna pretensión fundamental sobre la verdad. La descripción matemática de la energía oscura permite que se debilite, frenando la expansión acelerada, o que se fortalezca, dando gas adicional a la expansión acelerada. Mirando desde el undécimo piso, esta última situación - la gravedad repulsiva que se hace más fuerte - es la posibilidad más desfavorable; si nos damos cuenta, nos precipitamos hacia un violento ajuste de cuentas que los físicos llaman el *gran desgarro.*

Un empuje repulsivo cada vez más poderoso de la gravedad triunfaría, con el tiempo, sobre todas las fuerzas que se unen, con el resultado de que todo se desgarraría. Su cuerpo se mantiene intacto por la fuerza electromagnética, uniendo sus componentes atómicos y moleculares, y también por la fuerte fuerza nuclear, uniendo los protones y neutrones

dentro de los núcleos atómicos de su cuerpo. Debido a que estas fuerzas son mucho más fuertes que el actual empuje hacia el exterior del espacio en expansión, tu cuerpo se mantiene firme. Si te estás ensanchando, no es porque el espacio se esté expandiendo. Pero si la fuerza del empuje repulsivo crece cada vez más, el espacio dentro de tu cuerpo se expandirá finalmente con un empuje exterior tan poderoso que superará las fuerzas electromagnéticas y nucleares que te mantienen unido. Se hinchará y finalmente estallará en pedazos, como todo lo demás.

Los detalles dependen de la velocidad a la que aumenta la gravedad repulsiva, pero en un ejemplo representativo elaborado por los físicos Robert Caldwell, Marc Kamionkowski y Nevin Weinberg, dentro de unos 20.000 millones de años la gravedad repulsiva hará que se separen los cúmulos de galaxias, y unos 1.000 millones de años más tarde las estrellas que constituyen la Vía Láctea serán despedidas como destellos en un espectáculo de fuegos artificiales, Unos sesenta millones de años después de que la Tierra y los demás planetas del sistema solar sean alejados del sol, unos meses más tarde la fuerza gravitatoria repulsiva entre las moléculas hará que las estrellas y los planetas exploten, y con el paso de sólo treinta minutos más la repulsión entre las partículas que constituyen los átomos individuales habrá crecido tanto que incluso ellos serán despedazados. [15] El estado final del universo depende de la naturaleza cuántica actualmente desconocida del espacio y el tiempo. En términos generales que por ahora carecen de rigor matemático, es posible que la gravedad repulsiva destroce el propio tejido del espacio tiempo. La realidad comenzó con un bang, y en algún momento antes de que alcancemos el undécimo piso, cien mil millones de años desde el big bang, puede terminar con un desgarro.

Mientras que las observaciones actuales permiten una energía oscura que se hace más fuerte, yo, y muchos otros físicos, consideramos esto como una posibilidad poco probable. Al estudiar las ecuaciones, me quedo con la sensación de que sí, las matemáticas funcionan, apenas, pero no, las ecuaciones no son naturales o convincentes. Es un juicio basado en décadas de experiencia, no una prueba matemática, así que seguramente podría estar equivocado. Aún así, proporciona una motivación más que suficiente para ser optimista y asumir que el gran desgarro no hará que los pisos subsiguientes del Empire State Building sean irrelevantes. Con eso, continuamos nuestro viaje por la línea de tiempo.

No necesitamos subir mucho antes de encontrarnos con el siguiente evento crucial.

Los acantilados del espacio

Si la fuerza de la fuerza gravitatoria de repulsión no aumenta, sino que permanece constante, todos podemos respirar tranquilos; ser despedazados por la expansión del espacio ya no será una preocupación. Pero como la gravedad repulsiva seguirá impulsando a las galaxias distantes a alejarse cada vez más rápidamente, seguirá teniendo una profunda consecuencia a largo plazo: en aproximadamente un billón de años la velocidad de recesión de las galaxias distantes alcanzará y luego excederá la velocidad de la luz, lo que parece violar la regla más famosa del universo de Einstein. Un escrutinio más cercano deja claro que, en realidad, la regla se mantiene firme: El dictado de Einstein de que nada puede

exceder la velocidad de la luz se refiere únicamente a la velocidad de los objetos que se mueven *a través del* espacio. Las galaxias apenas se mueven por el espacio. No están dotadas de motores de cohetes. De la misma manera que las motas de pintura blanca pegadas a un trozo de lycra se separan cuando la lycra se estira, las galaxias están, en su mayor parte, pegadas al tejido del espacio y se separan porque el espacio se hincha. Cuanto más lejos esté una galaxia de otra, más espacio intermedio hay entre ellas para hincharse, y así más rápido se separarán las galaxias. La ley de Einstein no impone ningún límite a la velocidad de tal recesión.

A pesar de eso, el límite de velocidad de la luz sigue siendo inmensamente significativo. La luz que cada galaxia emite viaja a través del espacio. Y así como un kayakista se bloquearía si remara río arriba a una velocidad menor que la de la propia corriente, la luz emitida por una galaxia que se aleja corriendo a una velocidad superlumínica luchará una batalla perdida mientras intenta alcanzarnos. Atravesando el espacio a la velocidad de la luz, la luz no puede superar el aumento de la distancia a la Tierra a una velocidad superior a la de la luz. Como resultado, cuando los futuros astrónomos miren más allá de las estrellas cercanas y enfoquen sus telescopios en las partes más profundas del cielo nocturno, todo lo que verán será una oscuridad negra y aterciopelada. Las galaxias distantes se habrán deslizado más allá de los límites de lo que los astrónomos llaman nuestro horizonte cósmico. Será como si las galaxias distantes hubieran caído de un acantilado en el borde del espacio.

Me he centrado en las galaxias distantes porque las que están relativamente cerca, un cúmulo de unas treinta galaxias conocido como Grupo Local, seguirán siendo nuestras compañeras cósmicas. De hecho, para el undécimo piso, el Grupo Local, dominado por las galaxias de la Vía Láctea y Andrómeda, probablemente se habrá fusionado, una futura unión que los astrónomos han bautizado como *Láctea* (yo habría presionado por *Andrómeda*). Las estrellas de Milkomeda estarán todas lo suficientemente cerca para que sus mutuos tirones gravitacionales soporten la expansión del espacio y mantengan la colección estelar intacta. Pero nuestro contacto cortado con las galaxias más distantes será una profunda pérdida. Fue a través de cuidadosas observaciones de galaxias distantes que Edwin Hubble se dio cuenta por primera vez de que el espacio se está expandiendo, un descubrimiento confirmado y refinado por un siglo de observaciones posteriores. Sin acceso a las galaxias distantes, perderemos una herramienta de diagnóstico primaria para rastrear la expansión espacial. Los mismos datos que nos guiaron hacia nuestra comprensión del big bang y la evolución cósmica ya no estarán disponibles.

El astrónomo Avi Loeb ha sugerido que las estrellas de alta velocidad que continuamente escapan del conglomerado de la Milkomeda y se desvían hacia el espacio profundo podrían proporcionar un sustituto para las galaxias distantes, como lanzar palomitas de maíz desde una balsa para rastrear las corrientes descendentes. Pero Loeb también reconoce que la implacable expansión acelerada tendrá un impacto devastador en la capacidad de los futuros astrónomos para llevar a cabo mediciones cosmológicas precisas. [16] Como ejemplo, en el duodécimo piso, aproximadamente un billón de años después del estallido, la importantísima radiación cósmica de fondo de microondas, que guió nuestras exploraciones cosmológicas en el capítulo 3, habrá sido tan estirada y diluida

por la expansión cósmica (tan *desplazada hacia el rojo*, en la jerga técnica) que probablemente será imposible de detectar.

Hace que te preguntes: suponiendo que los datos que hemos reunido, estableciendo que el universo se está expandiendo, fueran de alguna manera preservados y entregados a las manos de los astrónomos dentro de un billón de años, ¿lo creerían? Usando su equipo de última generación, un billón de años en la fabricación, verán un universo que en la mayor de las distancias es negro, casi tan eterno e inmutable como se puede. Puedes imaginarte que dejarían de lado los pintorescos resultados heredados de una antigua y primitiva época, y en su lugar aceptarían la conclusión errónea de que, en general, el universo es estático.

Incluso en un mundo sujeto a un aumento implacable de la entropía, nos hemos acostumbrado a que las mediciones siempre mejoren, los conjuntos de datos siempre crezcan, la comprensión siempre se refine. La expansión acelerada del espacio puede subvertir estas expectativas. La expansión acelerada puede causar que la información esencial se aleje tan rápidamente que se vuelva inaccesible. Las verdades profundas pueden llamar silenciosamente a nuestros descendientes desde más allá del horizonte.

El Crepúsculo de las Estrellas

Las primeras estrellas comenzaron a formarse en el octavo piso, aproximadamente cien millones de años después del big bang, y continuarán formándose mientras queden las materias primas para hacer nuevas estrellas. ¿Cuánto tiempo será eso? Bueno, la lista de ingredientes es corta: todo lo que se necesita es una nube suficientemente grande de gas de hidrógeno. Como hemos visto, la gravedad se encarga de ello, exprimiendo lentamente la nube, calentando su núcleo y encendiendo la fusión nuclear. Si conoces la cantidad de gas que contiene la galaxia, y sabes la velocidad a la que dicha formación estelar agota las reservas de gas, puedes estimar la duración de la formación estelar. Hay sutilezas que hacen que la contabilidad sea más compleja (la tasa de formación de estrellas en una galaxia puede cambiar con el tiempo; a medida que las estrellas se queman, devuelven parte de su composición gaseosa a la galaxia, aumentando las reservas), pero con cálculos refinados los investigadores han llegado a la conclusión de que para el piso catorce, unos cien billones de años en el futuro, la formación de estrellas en la gran mayoría de las galaxias llegará a su fin.

Continuando la escalada desde el piso 14, hay algo más que también notaremos. Las estrellas se desvanecerán. Cuanto más masiva es una estrella, más su peso aplasta su núcleo y más caliente es su temperatura central. A su vez, la temperatura más caliente estimula una tasa más rápida de fusión nuclear y por lo tanto una combustión más rápida de las reservas nucleares de la estrella. Mientras que el sol arderá brillantemente durante unos diez mil millones de años, las estrellas mucho más pesadas habrán agotado su combustible nuclear mucho antes de ese momento. Por el contrario, las estrellas de peso ligero, hasta aproximadamente una décima parte de la masa del sol, se queman más suavemente y por lo tanto viven mucho más tiempo. Los astrónomos utilizan el nombre genérico de *enana roja* para etiquetar un surtido de tales estrellas de baja masa, y de acuerdo con las observaciones probablemente representan la mayoría de las estrellas del universo. Sus temperaturas

relativamente bajas y la lenta y metódica quema de hidrógeno (las corrientes de agitación dentro de una enana roja aseguran que casi todo el depósito de hidrógeno de la estrella se quema en el núcleo) permiten a las enanas rojas continuar brillando durante muchos billones de años, miles de veces la vida del sol. Pero para el decimocuarto piso, incluso una estrella enana roja de florecimiento tardío estará funcionando con gases.

Y así, a medida que ascendemos desde el piso 14, las galaxias se parecerán a las ciudades quemadas de un futuro distópico. El una vez vibrante cielo nocturno lleno de brillantes estrellas estará ahora poblado de cenizas carbonizadas. Aún así, debido a que la atracción gravitatoria de una estrella depende sólo de su masa, y no de si es brillante o ardiente en la oscuridad, aquellas estrellas que albergan planetas continuarán haciéndolo en su mayoría.

Para un piso más.

El crepúsculo del orden astronómico

Mirando hacia un cielo nocturno despejado da la impresión de que la galaxia es densa en estrellas. No es así. Aunque parece que las estrellas están dispuestas mejilla por mejilla en una esfera que nos rodea, porque sus distancias a la Tierra varían mucho, un rasgo que se pierde en nuestros débiles y cercanos ojos, las estrellas están, en realidad, bastante lejos unas de otras. Si se redujera el sol al tamaño de un grano de azúcar y se colocara en el Empire State Building, habría que conducir la mayor parte del camino a Greenwich, Connecticut, para encontrar a Próxima Centauri, nuestro vecino estelar más cercano. Y no tendrías que conducir rápidamente para asegurarte de que Próxima aún estuviera cerca de Greenwich cuando llegaras allí. A esta escala, las velocidades estelares típicas son de menos de un milímetro por hora. Como en un juego de etiqueta jugado por babosas muy dispersas, sólo en raras ocasiones las estrellas chocarán o incluso fallarán por poco.

Esa conclusión, sin embargo, se basa en duraciones conocidas -años, siglos, milenios- y por lo tanto debe ser reconsiderada a la luz de las escalas de tiempo mucho más largas que estamos considerando ahora. En el piso 15, estamos a un millón de miles de millones de años del estallido. Y durante ese tiempo hay una gran posibilidad de que las estrellas distantes y de movimiento lento de hoy hayan tenido numerosas llamadas cercanas. En tal encuentro, ¿qué sucederá?

Enfoquémonos en la Tierra e imaginemos que otra estrella pasa de largo. Dependiendo de la masa y la trayectoria del intruso, su atracción gravitatoria puede sólo perturbar levemente el movimiento de la Tierra. Un intruso ligero que mantiene una buena distancia no causará estragos. Pero la atracción gravitatoria de una estrella más masiva que pasa más cerca podría fácilmente arrancar a la Tierra de su órbita, enviándola a toda velocidad a través del sistema solar y dirigiéndose al espacio profundo. Y lo que es cierto para la Tierra es cierto para la mayoría de los otros planetas que orbitan la mayoría de las otras estrellas en la mayoría de las otras galaxias. A medida que subimos en la línea de tiempo, más y más planetas serán lanzados al espacio por la disruptiva atracción gravitacional de las estrellas

descarriadas. De hecho, aunque es extremadamente improbable, la Tierra podría sufrir este destino antes de que el sol se queme.

Si esto sucediera, la distancia cada vez mayor de la Tierra al sol haría que su temperatura bajara continuamente. Las capas superiores de los océanos del mundo se congelarían, al igual que cualquier otra cosa que quede en la superficie. Los gases atmosféricos, predominantemente nitrógeno y oxígeno, se licuarían y gotearían de los cielos. ¿Podría sobrevivir la vida? En la superficie de la Tierra, eso sería una tarea difícil. Pero como hemos visto, la vida prospera y de hecho puede haberse originado en oscuras fumarolas térmicas que salpican el fondo del océano. La luz del sol no puede penetrar en ninguna parte cerca de tales profundidades, y por lo tanto los respiraderos apenas se verán afectados por la ausencia del sol. En cambio, una parte sustancial de la energía que alimenta los respiraderos proviene de reacciones nucleares difusas pero continuas. [17] El interior de la Tierra contiene un almacén de elementos radioactivos (principalmente torio, uranio y potasio), y a medida que estos átomos inestables se descomponen, emiten una corriente de partículas energéticas que calientan los alrededores. Por lo tanto, tanto si la Tierra disfruta o no del calor generado por la fusión nuclear en el sol, continuará disfrutando del calor generado por la fisión nuclear en su interior. Si la Tierra fuera expulsada del sistema solar, es posible que la vida en el fondo del océano continuara durante miles de millones de años como si nada hubiera pasado.[18]

Tales coches de choque estelares no sólo interrumpirán los sistemas solares, sino que durante períodos aún más largos también interrumpirán las galaxias. En los casi accidentes entre estrellas serpenteantes o, más raramente, en colisiones frontales, la velocidad de la estrella más pesada tiende a disminuir mientras que la de la más ligera tiende a aumentar. (Balancea una pelota de ping-pong en una pelota de baloncesto y, a medida que la pila cae al suelo y rebota, serás testigo de la colisión impartiendo un impresionante aumento de velocidad a la pelota de ping-pong). [19] En cualquier encuentro individual, tales intercambios serán típicamente modestos, pero a lo largo de vastas duraciones su efecto acumulativo puede sumar cambios significativos en las velocidades estelares. El resultado será un inventario constante de estrellas que serán impulsadas a velocidades tan altas que escaparán de su galaxia anfitriona. Cálculos detallados revelan que a medida que pasemos el piso 19 y continuemos hacia el 20, las galaxias típicas se agotarán por este proceso. Sus estrellas, en su mayoría restos incinerados, serán expulsadas y dejadas a la deriva por el espacio.[20]

El omnipresente orden astronómico manifestado en los sistemas solares y las galaxias se habrá disuelto; estas estructuras, ahora omnipresentes, se habrán convertido en patrones que el universo ha retirado.

Ondas gravitacionales y el barrido final

Si la Tierra es afortunada y esquiva el sol hinchado en el piso 11, y si escapa de ser expulsada por la visita perturbadora de sus vecinos estelares, su destino final estará determinado por un rasgo completamente hermoso de la teoría general de la relatividad, *las ondas gravitacionales.*

Al explicar la idea central pero abstracta de la relatividad general del espacio tiempo curvo, los físicos a menudo invocan una metáfora familiar: nos imaginamos planetas orbitando una estrella como si fueran canicas que ruedan sobre una tensa lámina de goma deformada por una bola de bolos colocada en el centro. Pero la metáfora plantea una pregunta. ¿Por qué los planetas no giran en espiral hacia la estrella y caen en ella? Después de todo, el destino análogo seguramente recae sobre las canicas. [21] La respuesta es que las canicas giran en espiral hacia adentro porque pierden energía por fricción. De hecho, incluso sin ningún equipo de lujo se puede detectar la evidencia de esto: parte de la energía perdida llega a tus oídos, permitiéndote escuchar las canicas rodando sobre la lámina de goma. Los planetas en órbita mantienen su movimiento porque prácticamente no hay fricción en el espacio vacío.

Aunque la fricción no es un factor, un planeta pierde una pequeña cantidad de energía en cada órbita. Cuando los cuerpos astronómicos se mueven, perturban el tejido del espacio, generando ondas que se propagan hacia el exterior similares a las que se producirían en la lámina de caucho si la golpearas persistentemente. Tales ondulaciones en el tejido del espacio son las ondas gravitacionales que Einstein predijo en artículos que publicó en 1916 y 1918. En las décadas siguientes, Einstein tuvo sentimientos encontrados sobre las ondas gravitacionales, considerándolas, en el mejor de los casos, como una mera posibilidad teórica que nunca se observaría y, en el peor, como una interpretación totalmente errónea de las ecuaciones. Las matemáticas de la relatividad general son tan sutiles que incluso Einstein se quedó a veces perplejo. A muchas personas les llevó muchos años desarrollar métodos sistemáticos para superar cuestiones espinosas que, de otro modo, confundirían los intentos de vincular las expresiones matemáticas de la relatividad general con características mensurables del mundo. En la década de 1960, con tales métodos firmemente establecidos, los físicos ganaron confianza en que las ondas gravitacionales eran una consecuencia incuestionable de la teoría. Aún así, nadie tenía ninguna prueba experimental u observacional de que las ondas gravitacionales fueran reales.

Alrededor de una década y media después, eso cambió. En 1974, Russell Hulse y Joe Taylor descubrieron el primer sistema de estrellas de neutrones binarias conocido, un par de estrellas de neutrones encerradas en una órbita rápida. [22] Observaciones posteriores establecieron que con el tiempo las estrellas de neutrones se acercaban en espiral, lo que prueba que el sistema binario estaba perdiendo energía. Pero, ¿a dónde iba la energía? [23] Taylor, y sus colaboradores Lee Fowler y Peter McCulloch, anunciaron que la pérdida medida de energía orbital estaba en notable acuerdo con la predicción de la relatividad general sobre la energía que las estrellas de neutrones en órbita deberían bombear en ondas gravitacionales. [24] Aunque las ondas gravitatorias producidas eran demasiado débiles para ser detectadas, estos trabajos establecieron, aunque indirectamente, que las ondas gravitatorias eran reales.

Tres décadas y mil millones de dólares más tarde, el Observatorio de Ondas Gravitatorias con Interferómetro Láser fue más allá, estableciendo la primera detección directa de ondas en el tejido del espacio. Temprano en la mañana del 14 de septiembre de 2015, dos enormes detectores, uno en Louisiana y el otro en el estado de Washington, ambos heroicamente protegidos de cualquier posible perturbación salvo una onda

gravitacional, se movieron. Y precisamente de la misma manera. Los investigadores se habían estado preparando para este momento durante casi medio siglo, pero habían terminado de calibrar los recién actualizados detectores apenas dos días antes. La detección casi inmediata de una señal fue tanto una sorpresa como una preocupación. ¿Era real? ¿Era el descubrimiento de toda una vida o el trabajo de un bromista, o peor, alguien había hackeado el sistema e inyectado una señal falsa?

Después de meses de análisis meticuloso, comprobando y volviendo a comprobar los detalles de la supuesta perturbación gravitatoria, los investigadores anunciaron que una onda gravitatoria había rodado efectivamente por la Tierra. Es más, analizando con precisión el tic y comparándolo con los resultados de las simulaciones por supercomputadora de las ondas gravitatorias que deberían ser producidas por varios eventos astronómicos, los investigadores hicieron ingeniería inversa de la señal para determinar la fuente. Concluyeron que hace 1.300 millones de años, en una época en la que la vida multicelular apenas comenzaba a fusionarse en el planeta Tierra, dos agujeros negros distantes orbitaban cada vez más cerca y más rápidamente, acercándose a la velocidad de la luz, hasta que en un frenesí orbital final se chocaron entre sí. La colisión generó un maremoto en el espacio, un tsunami gravitacional tan enorme que su potencia superó a la producida por cada estrella de cada galaxia del universo observable. La ola corrió hacia afuera a la velocidad de la luz, en todas las direcciones, y así parte se dirigió hacia la tierra, diluyéndose en potencia a medida que se extendía cada vez más ampliamente. Hace unos cien mil años, mientras los humanos emigraban de la sabana africana, la ola onduló el halo de materia oscura que rodeaba la galaxia de la Vía Láctea mientras continuaba su implacable carrera. Hace unos cien años, la ola pasó corriendo por el cúmulo de estrellas de las Híades y, al hacerlo, un miembro de nuestra especie, Albert Einstein, comenzó a pensar en las ondas gravitacionales y escribió los primeros artículos sobre esta posibilidad. Unos cincuenta años más tarde, a medida que la onda avanzaba, otros investigadores propusieron audazmente que tales ondas podrían ser detectadas y comenzaron a diseñar y planificar un dispositivo que pudiera hacerlo. Y cuando la onda estaba a sólo dos días luz de la Tierra, la versión recién actualizada del más avanzado de estos detectores estaba lista para funcionar. Dos días más tarde, esos dos detectores temblaron durante doscientos milisegundos, recogiendo datos que permitieron a los científicos reconstruir la historia que acabo de relatar. Por este logro, los líderes del equipo, Ray Weiss, Barry Barish y Kip Thorne fueron galardonados con el Premio Nobel 2017.

Estos descubrimientos, emocionantes por sí mismos, son relevantes aquí porque es en el piso veintitrés donde la Tierra (de nuevo, asumiendo que la Tierra está todavía en órbita), habiendo perdido energía a través de una versión del mismo proceso - la lenta pero implacable producción de ondas gravitacionales - entrará en espiral hacia el sol, que ha muerto hace tiempo. Para otros planetas, la historia es similar, aunque las escalas de tiempo pueden diferir. Los planetas más pequeños perturban más suavemente el tejido y por lo tanto tienen espirales de muerte más largas, al igual que los planetas cuyas órbitas están más lejos de su estrella anfitriona. Tomando a la Tierra como representante de los planetas que pueden persistir tercamente en su órbita, concluimos que para el piso veintitrés tales planetas, resignados a su destino, se sumergirán en una violenta comunión final con su frío sol.

Durante sus etapas finales, las galaxias seguirán una secuencia análoga. En el centro de la mayoría de las galaxias hay un enorme agujero negro, de millones o incluso miles de millones de veces la masa del sol. A medida que subimos desde el piso 23, las únicas estrellas que quedan en las galaxias serán brasas quemadas que, habiendo evitado la eyección, orbitarán lentamente el agujero negro central de la galaxia. Y de la misma manera que los planetas giran lentamente hacia adentro mientras su energía orbital es canalizada en ondas gravitacionales, también lo hacen las estrellas alrededor de un agujero negro galáctico. Al estimar la tasa de tal transferencia de energía, los investigadores han concluido que para el piso veinticuatro la mayoría de los restos estelares se habrán consumido, cayendo en el oscuro abismo central de su galaxia. [25] Si una galaxia tiene rezagadas, estrellas quemadas que son pequeñas y distantes, el agujero negro central ofrecerá una ayuda adicional, tirando implacablemente de las estrellas, persuadiéndolas para que se desplacen cada vez más cerca de su desaparición final. Teniendo en cuenta ambas influencias, los agujeros negros centrales barrerán la mayoría de las galaxias de estrellas hasta el piso treinta, 1030 años desde el big bang, si no antes.

En esta época, un viaje por el cosmos no será exactamente un asunto de alboroto. Puntuado aquí y allá por planetas fríos, estrellas quemadas y monstruosos agujeros negros, el espacio será oscuro y desolado.

El destino de la materia compleja

En medio de las transformaciones ambientales extremas que hemos encontrado, ¿puede la vida persistir? Es una pregunta desafiante en gran parte porque, como se subrayó al principio de este capítulo, no tenemos ni idea de cómo será la vida en el futuro lejano. Una característica aparentemente cierta es que la vida, de cualquier tipo, necesitará aprovechar la energía adecuada para impulsar sus funciones de mantenimiento de la vida: metabólicas, reproductivas, lo que sea. A medida que las estrellas se quemen, sean expulsadas al espacio profundo, o entren en espiral en agujeros negros omnívoros, esa tarea será cada vez más difícil. Hay ideas creativas, como aprovechar las partículas de materia oscura que creemos que vuelan por el espacio, que pueden producir energía cuando los pares chocan y se transforman en fotones. [26] Pero el asunto es el siguiente: incluso si alguna forma de vida es capaz de aprovechar una nueva fuente de energía útil, a medida que continuamos nuestra escalada es probable que surja otro desafío, más significativo que todos los demás.

La materia en sí misma puede desintegrarse.

En el corazón de todos los átomos, formando todas las moléculas, y ensamblados en todas las estructuras materiales complejas desde la vida hasta las estrellas, están los protones. Si los protones tuvieran la tendencia a desintegrarse en un spray de partículas más ligeras (como los electrones y los fotones), la materia se desmoronaría y el universo cambiaría radicalmente. [27] Nuestra existencia atestigua la estabilidad de los protones, al menos en escalas de tiempo iguales a la duración de vuelta al big bang. Pero, ¿qué pasa con las escalas de tiempo más largas que estamos considerando ahora? Durante casi medio siglo los físicos han encontrado intrigantes indicios matemáticos de que en tales inmensas duraciones los protones pueden, de hecho, decaer.

En la década de 1970, los físicos Howard Georgi y Sheldon Glashow desarrollaron la primera *gran teoría unificada*, un marco matemático que, en el papel, une las tres fuerzas no gravitacionales. [28] Aunque las fuerzas fuertes, débiles y electromagnéticas tienen propiedades muy diferentes cuando se examinan en los experimentos de laboratorio, en Georgi y

El esquema de Glashow estas distinciones disminuyen constantemente a medida que las tres fuerzas se examinan en distancias cada vez más pequeñas. La gran unificación propone que estas tres fuerzas son en realidad facetas diferentes de una sola fuerza maestra, una unidad en el funcionamiento de la naturaleza que se revela sólo en la más pequeña de las escalas.

Georgi y Glashow se dieron cuenta de que con las conexiones propuestas por la gran unificación entre las fuerzas vienen nuevas conexiones entre las partículas de materia. Y tales conexiones permiten una gran cantidad de nuevas transmutaciones de partículas, incluyendo algunas que resultarían en la decadencia de los protones. Afortunadamente, el proceso sería lento. Sus cálculos mostraron que si sostuvieras un montón de protones en la palma de tu mano y esperaras a que la mitad se desintegrara, tendrías que sostenerlos durante unos mil billones de billones de años, el tiempo suficiente para subir al trigésimo piso del Empire State Building. Es una curiosa predicción, una que parece estar más allá de la verificación. ¿Quién tendría la paciencia para probarla?

La respuesta surge de un simple pero inteligente movimiento. Así como las probabilidades de que haya un ganador en la lotería de esta semana serán casi nulas si el estado logra vender sólo un puñado de boletos pero aumentarán enormemente si la venta de boletos se dispara, las probabilidades de ser testigo de una decadencia de protones en una pequeña muestra son casi nulas pero aumentarán enormemente si el tamaño de la muestra se amplía. [29] Así pues, llene una enorme cuba con millones de galones de agua purificada (cada galón proporciona unos 1026 protones), rodee la muestra con detectores exquisitamente sensibles y mire fijamente, día y noche, buscando el signo revelador de los productos de la decadencia de un protón (que, según la propuesta de Georgi-Glashow, es una partícula conocida como *pión*, junto con un *antielectrón*).

Buscar el detritus de partículas de un solo protón en descomposición nadando en un mar de compañeros tan numeroso que su población excede por mucho los granos de arena que componen todas las playas y todos los desiertos del planeta podría parecer una persecución que traería paroxismos de deleite a los gansos salvajes de todo el mundo. Pero el hecho es que,

Pero el hecho es que brillantes equipos de físicos experimentales han demostrado de forma concluyente que si un protón del tanque se desintegrara, sus detectores harían sonar la alarma.

Fui uno de los estudiantes de Georgi a mediados de los 80 cuando su teoría unificada fue puesta a prueba. Yo era un estudiante universitario, estudiando material más básico, por lo que no entendía completamente lo que estaba pasando. Pero podía sentir la anticipación. La unidad de la naturaleza, un sueño que tanto había impulsado a Einstein, estaba a punto de ser revelada. Entonces pasó un año sin que hubiera evidencia de que un solo protón se descompusiera. Seguido por otro año. Y otro más. La falta de observación de la desintegración de los protones permitió a los investigadores establecer un límite más bajo en la vida del protón, que actualmente es de unos 1034 años.

La propuesta de Georgi y Glashow es magnífica. Dejando de lado los rompecabezas de la gravedad cuántica por un día más, su teoría abarca las tres fuerzas restantes de la naturaleza así como todas las partículas de materia a través de una elegante, rigurosa e ingeniosa fusión de matemáticas y física. Es una obra maestra intelectual. Y sin embargo, ante su propuesta, la naturaleza se encogió de hombros. Mucho más tarde, hablé con Georgi sobre la experiencia. Describió los decepcionantes experimentos como "ser abofeteado por la naturaleza", una experiencia, añadió, que lo puso en contra de todo el programa de unificación.[30]

Pero el programa de unificación continuó. Y continúa. Y un rasgo común de casi todos los enfoques que se han seguido -teorías de Kaluza-Klein, supersimetría, supergravedad, supercuerdas, así como extensiones más sencillas de la gran unificación de Georgi y Glashow (sobre todo lo que se puede leer en *El Universo Elegante*)- es que se predice que los protones decaerán. Las propuestas en las que la tasa de tal decadencia es cercana a la del esquema original de Georgi y Glashow son inmediatamente descartadas. Pero muchas teorías unificadas propuestas predicen tasas más lentas de decaimiento de protones que son compatibles con los límites experimentales más refinados. Los números típicos van desde 1034 años a 1037 años, y algunas predicciones son aún más largas.

El punto es que a medida que hemos continuado desarrollando nuestra comprensión matemática del cosmos, la decadencia de los protones ha levantado la cabeza en casi cada vuelta. No es imposible manipular nuestras ecuaciones para evitar la decadencia de los protones, pero para lograrlo a menudo se requieren manipulaciones matemáticas retorcidas que van en contra de los relatos teóricos de que los éxitos del pasado han demostrado ser relevantes para la realidad. Debido a esto, muchos teóricos anticipan que los protones de hecho decaen. Esto podría estar equivocado, y en las notas finales considero brevemente la alternativa.[31] Pero aquí, para ser definitivo, tomaré la vida del protón como unos 1038 años.

La implicación es que a medida que subimos del trigésimo octavo piso, cada átomo que se ha combinado en cada molécula que se ha ensamblado en cada estructura que ha aparecido en el cosmos - rocas, agua, conejos, árboles, tú, yo, planetas, lunas, estrellas, etc. - se desintegrará. Todo se desmorona. El universo se quedará con componentes de partículas aisladas, principalmente electrones, positrones, neutrinos y fotones, que fluyen a través de un cosmos que está puntuado aquí y allá por agujeros negros inactivos y voraces.

En los pisos inferiores, el desafío dominante de la vida es aprovechar la energía adecuada de alta calidad y baja entropía para alimentar los procesos de la materia animada. El desafío desde el piso 38 hacia arriba es más básico. Con la disolución de los átomos y las moléculas, el andamiaje de la vida y la mayoría de la estructura del cosmos se habrá desmoronado. Así que si la vida ha llegado hasta aquí, ¿se estrellará ahora contra el muro final? Tal vez. Pero, tal vez también, en las escalas de tiempo que estamos considerando -más de un billón de billones de veces la edad actual del universo- la vida habrá evolucionado en una forma que ha descartado durante mucho tiempo cualquier necesidad de la arquitectura biológica que requiere actualmente. Quizás las mismas categorías de vida y mente se vuelvan toscas y torpes por las futuras encarnaciones que requieran nuevas caracterizaciones en conjunto.

Subyace a esa especulación la suposición de que la vida y la mente no dependen de ningún sustrato físico en particular, como las células, los cuerpos y los cerebros, sino que son conjuntos de procesos integrados. La biología ha monopolizado hasta ahora las actividades de la vida, pero eso puede que sólo refleje los caprichos de la evolución por selección natural en el planeta Tierra. Si algún otro arreglo de partículas básicas ejecutara fielmente los procesos de la vida y la mente, entonces ese sistema vivirá y ese sistema pensará.

Nuestro enfoque aquí es adoptar la perspectiva más amplia y considerar la posibilidad de que incluso en ausencia de átomos y moléculas complejas, pueda existir algún tipo de mente pensante. Y así nos preguntamos: Con nuestra única limitación, completamente inflexible, siendo que el proceso de pensamiento se ajusta plenamente a las leyes de la física, ¿puede el pensamiento persistir indefinidamente?

El futuro del pensamiento

Evaluar el futuro del pensamiento puede parecer un clásico acto de arrogancia. A través de la experiencia personal cada uno de nosotros sabemos lo que es pensar, pero como quedó claro en el capítulo 5, la rigurosa ciencia de la mente está en una etapa temprana. En cuanto a la ciencia del movimiento, pasamos de las leyes de Newton a las radicalmente distintas de Schrödinger en menos de tres siglos, así que ¿cómo podemos esperar decir algo relevante para el futuro del pensamiento en escalas temporales de las que apenas se registran mil millones de siglos?

La pregunta evoca uno de nuestros temas centrales. El universo puede y debe ser entendido desde una amplia gama de perspectivas distintas. Las explicaciones resultantes, cada una de ellas relevante para tipos particulares de preguntas, deben ser sintetizadas en última instancia en una narrativa coherente, pero se puede avanzar en algunas de estas historias incluso con un conocimiento limitado de muchas otras. Newton no tenía el menor indicio sobre la física cuántica, pero logró comprender el tipo de movimiento que encontramos en las escalas cotidianas. Cuando la física cuántica apareció, el edificio de Newton no fue desmantelado. Fue renovado. La mecánica cuántica proporcionó una nueva base que profundizó el alcance de la ciencia y dio a la estructura newtoniana una nueva interpretación.

Es posible que las reflexiones matemáticas actuales sobre el futuro de la mente resulten irrelevantes. Después de todo, a menos que estés particularmente bien versado en la historia de la física y la filosofía, probablemente nunca has oído hablar de la descripción entelechial del movimiento de Aristóteles o de la teoría de la visión del fuego en el ojo de Empédocles. A medida que los humanos exploramos, ciertamente nos equivocamos en algunas cosas, bueno, en muchas cosas. Pero al igual que con la física newtoniana, también existe la posibilidad de que tales reflexiones en la mente sean consideradas algún día parte de una crónica más amplia. Es con este sentido de optimismo, racional y templado, que consideramos el futuro lejano del pensamiento.

En 1979, Freeman Dyson escribió un artículo visionario sobre el futuro lejano de la vida y la mente.[32] Seguiremos de cerca su ejemplo, incorporando actualizaciones basadas en los avances teóricos más recientes y en las observaciones astronómicas. El enfoque de Dyson, muy parecido al nuestro a lo largo de estas páginas, adopta una visión fisicalista de la mente, considerando el acto de pensar como un proceso físico totalmente sujeto a la ley física. Y puesto que tenemos un manejo razonablemente bueno de cómo las características generales del universo evolucionarán hacia el futuro lejano, podemos investigar si seguirá habiendo entornos favorables al pensamiento.

Empecemos por pensar en tu cerebro. Entre sus otras cualidades, tu cerebro está caliente. Absorbe continuamente energía, que usted suministra comiendo, bebiendo y respirando; emprende una serie de procesos fisicoquímicos que modifican su configuración detallada (reacciones químicas, reordenamientos moleculares, movimientos de partículas, etc.); y libera calor residual al medio ambiente. Como su cerebro piensa (y hace todo lo demás que hacen los cerebros), recapitula así una secuencia que encontramos por primera vez en el capítulo 2 al analizar las máquinas de vapor. Al igual que en esa plantilla, el calor que su cerebro libera al medio ambiente lleva consigo la entropía que absorbe y genera a través de su funcionamiento interno.

Si, por cualquier razón, una máquina de vapor es incapaz de eliminar su acumulación entrópica, tarde o temprano se pondrá en rojo y fallará. Un destino similar le sucederá a un cerebro que, por cualquier razón, no puede eliminar los residuos entrópicos que su funcionamiento produce continuamente. Y un cerebro que falla es un cerebro que ya no piensa. Ahí está el desafío potencial a la durabilidad del pensamiento basado en el cerebro. A medida que el universo progresa cada vez más hacia el futuro, ¿mantendrán los cerebros la capacidad de expulsar el calor residual que producen?

Nadie espera que los cerebros humanos sean una presencia constante mientras subimos desde hoy a pisos cada vez más altos. Y, ciertamente, para cuando hayamos subido lo suficiente para que los átomos empiecen a desintegrarse en partículas más básicas, las aglomeraciones moleculares complejas de cualquier tipo serán cada vez más raras. Pero el requisito de diagnóstico de ser capaz de expulsar el calor residual es tan fundamental que se aplica a cualquier configuración de cualquier tipo que emprenda el proceso de pensamiento. Por lo tanto, la pregunta esencial es si una entidad de este tipo -llamémosla el Pensador-, independientemente de cómo se diseñe o construya, puede expulsar el calor que su pensamiento necesariamente genera. Si el Pensador no lo hace, se sobrecalentará y se

quemará en su propio desecho entrópico. Y si las limitaciones impuestas por la ley física en un universo en expansión dictan que todo Pensador en todas partes, tarde o temprano, está destinado a fracasar en esta tarea indispensable de eliminación de la entropía, el futuro del propio pensamiento estará en peligro.

Para evaluar el futuro del pensamiento, necesitamos por lo tanto entender la física del pensamiento. ¿Cuánta energía requiere el pensamiento del pensador y cuánta entropía genera el proceso de pensar? ¿A qué ritmo necesita el Pensador para expulsar el calor residual y a qué ritmo puede el universo absorberlo?

Pensar despacio

Anteriormente, en el capítulo 2, enfaticé que la entropía cuenta el número de reordenamientos de los componentes microscópicos de un sistema físico -sus partículas- que "se parecen bastante". Al analizar al Pensador, hay una forma particularmente útil de replantear esto. Si un sistema tiene baja entropía, entonces la configuración de sus partículas es una de las relativamente pocas posibilidades de que todas se vean iguales, una de las relativamente pocas "doppelgängers". Por consiguiente, si le digo cuál es la configuración entre estas posibilidades que el sistema realmente realiza, le habré proporcionado sólo una pequeña cantidad de información. Como especificar una lata particular de sopa de tomate Campbell en un estante de una tienda de comestibles poco surtida, habré distinguido esta configuración particular de partículas de sólo un pequeño número de posibilidades. Si un sistema tiene una alta entropía, entonces la configuración de sus partículas es una entre un gran número de posibilidades que todas parecen iguales, una entre un gran número de doppelgängers. Por consiguiente, si le digo cuál es la configuración entre estas posibilidades que el sistema realmente realiza, le habré proporcionado un montón de información. Como especificar esa lata de sopa de tomate en el estante de un supermercado ridículamente abarrotado, habré distinguido esta configuración particular de partículas de un enorme número de posibilidades. Así que para un sistema con baja entropía, su configuración de partículas tiene un bajo contenido de información; para un sistema con alta entropía, su configuración de partículas tiene un alto contenido de información.

El vínculo entre la entropía y la información es importante porque, independientemente de dónde tenga lugar el pensamiento -dentro del cerebro humano o dentro del Pensador abstracto-, pensar es procesar información. La conexión información-entropía por lo tanto nos dice que el procesamiento de la información, la función del pensamiento, también puede ser descrito como procesamiento de entropía. Y puesto que, como recordarán del capítulo 2, el procesamiento de la entropía -desplazando la entropía de aquí a allí- requiere la transferencia de calor, tenemos una mezcla de tres conceptos: pensamiento, entropía y calor. Dyson aprovechó la versión matemática de los vínculos entre cada uno para cuantificar el calor que el Pensador necesita expulsar basándose en el número de pensamientos que tiene. (Para los matemáticamente inclinados, la fórmula está en las notas finales.) [33] Muchos pensamientos implica que mucho calor necesita ser expulsado. Menos pensamientos implica que menos calor necesita ser expulsado.

Ahora, para potenciar su pensamiento, el Pensador debe extraer energía de su entorno. Y debido a que el calor es en sí mismo una forma de energía, la cantidad de energía que el Pensador toma debe ser al menos tan grande como la cantidad de calor que el Pensador necesita expulsar. La energía de entrada tiene mayor calidad (por lo que puede ser fácilmente aprovechada por el Pensador) que el calor de salida (que es un desperdicio y por lo tanto se dispersará), pero el Pensador no puede liberar más de lo que absorbe. Así que el cálculo de Dyson especifica la mínima energía de alta calidad que el Pensador necesita absorber del entorno, cuantificando así el reto: a medida que las estrellas se queman, los sistemas solares se deshacen, las galaxias se dispersan, la materia se desintegra, y el universo se expande y enfría, el Pensador se enfrentará a la tarea cada vez más difícil de recoger la energía concentrada, de alta calidad y baja entropía que necesita para seguir cogiendo. Al escasear las provisiones, el Pensador necesita una estrategia efectiva de administración de recursos y eliminación de desechos, un plan detallado, es decir, para tomar la energía de baja entropía y eliminar el calor de alta entropía. Siguiendo a Dyson, vamos a elaborar uno.

Como primer paso, hagamos la suposición razonable de que la velocidad de los procesos internos del Pensador, cualquiera que sea, escala con la temperatura del Pensador. [34] A temperaturas más altas, las partículas se mueven más rápidamente, por lo que el Pensador piensa más rápidamente, consume energía más rápidamente y acumula residuos más rápidamente. A temperaturas más bajas, todo esto se ralentiza. Ante un universo que se expande, se enfría y se acaba, el Pensador, que aspira a seguir pensando durante el mayor tiempo posible, necesita dar prioridad a la conservación, ejecutando una larga y lenta combustión en lugar de un rápido e intenso destello. Por lo tanto, aconsejamos al Pensador que siga el ejemplo del universo: a medida que pasa el tiempo, el Pensador debería bajar continuamente su temperatura, ralentizar su pensamiento y disminuir la velocidad a la que consume la menguante oferta de energía de calidad del universo.

Dado que pensar es todo lo que hace el Pensador, la perspectiva de pensar más lentamente no es particularmente atractiva. Nosotros consolamos al Pensador. "Estás pensando todo esto mal", le decimos al Pensador. "Ya que *todos* tus procesos internos se ralentizarán juntos, tu experiencia subjetiva no cambiará en absoluto. No notarás ninguna alteración en tu pensamiento. Podrás ver varios procesos en el ambiente que parecen correr más rápido, pero tus pensamientos parecerán proceder con su habitual presteza." Aliviado, el Pensador acepta seguir la estrategia pero expresa una última preocupación. "Si sigo este enfoque, ¿seré capaz de pensar nuevos pensamientos para siempre?"

Esta es la pregunta central, y por eso anticipamos que el Pensador la haría. Y estamos listos. Las matemáticas revelan que, al igual que un coche cuyo consumo de kilómetro por galón mejora cuanto más despacio conduce, el consumo de energía del Pensador mejora cuanto más despacio piensa. Es decir, el pensamiento del Pensador se vuelve más eficiente a temperaturas cada vez más bajas. Por esta razón, el Pensador puede realmente pensar un número *infinito* de pensamientos y sin embargo sólo requiere un suministro finito de energía (tanto como una suma infinita como 1 + ½ + ¼ +... puede sumar un número finito, en este caso 2). Con entusiasmo informamos al Pensador del resultado: "Siguiendo el plan,

no sólo podrás seguir pensando para siempre, sino que también podrás hacerlo con un suministro finito de energía".[35]

Alegremente, el feliz Pensador está a punto de poner el plan en acción. Pero entonces nos encontramos con un obstáculo inesperado. Hay otra implicación molesta de las matemáticas que hasta ahora hemos pasado por alto: de alguna manera, como una taza de café más fría expulsa menos calor a su entorno que una más caliente, cuanto más frío se vuelve el Pensador, menos capaz es de liberar el calor residual que su pensamiento genera. "Sabéis muy poco sobre mí", nos recuerda el Pensador, "así que quizás se necesita discreción antes de difundir rumores de que tengo problemas para expulsar los residuos". Entendido. Pero eso, en realidad, es la belleza del cálculo. El razonamiento simplemente asume que el Pensador está sujeto a las leyes conocidas de la física y está compuesto de partículas elementales como los electrones. Por lo tanto, el análisis es completamente general. No necesitamos saber nada sobre la fisiología o construcción detallada del Pensador para concluir que a medida que la temperatura del Pensador disminuye, la velocidad a la que puede expulsar la entropía caerá por debajo de la velocidad a la que produce la entropía. Con esa conclusión, no tenemos otra opción que dar la noticia. "Aunque pensar a temperaturas cada vez más bajas es esencial para prolongar el pensamiento así como para necesitar sólo un suministro finito de energía, llegará un momento en que su entropía se acumulará más rápidamente de lo que puede expulsarla. Y a partir de ahí, si tratas de pensar más allá, te quemarás en tus propios pensamientos."[36]

Antes de que el pensador cabizbajo pueda pensarlo bien, un miembro de nuestro equipo de crack propone un camino a seguir: la hibernación. El Pensador necesita periódicamente dar un descanso al pensamiento, apagar su mente e ir a una producción de entropía que le haga dormir, mientras continúa limpiando todo su calor residual. Si el descanso del pensamiento es lo suficientemente largo, entonces cuando el Pensador se despierte habrá expulsado todos los residuos y por lo tanto ya no se enfrentará al peligro de quemarse. Y como el Pensador no estará pensando durante el tiempo de inactividad, cuando se despierte no notará la pausa. Envalentonados por la solución, una originalmente propuesta por Dyson en su innovador trabajo, aseguramos al Pensador que con este ritmo el pensamiento puede continuar para siempre.

¿Pero puede?

Una reflexión final sobre el pensamiento

Dos hechos ocurridos en las décadas posteriores al documento de Dyson son particularmente relevantes para la estrategia. Uno aclara el vínculo entre el acto de pensar y la producción de entropía, lo que lleva a una modesta reinterpretación del resultado. El otro pone de manifiesto la expansión acelerada del espacio, que tiene el potencial de socavar por completo la conclusión, colocando el pensamiento directamente en el punto de mira de la entropía.

Primero, la reinterpretación. El núcleo del razonamiento de Dyson es que el acto de pensar necesariamente produce calor. Hice esto plausible recordando que el pensamiento está ligado a la información, la información está ligada a la entropía, y la entropía está

ligada al calor. Pero los vínculos son sutiles, y los conocimientos más recientes, en gran parte procedentes de la informática, muestran que hay formas inteligentes de llevar a cabo el procesamiento de la información elemental, como añadir uno y uno y obtener dos, sin ninguna degradación de la energía. [37] Con la suposición de que el pensamiento y la computación están cortados por el mismo patrón, un pensador que invoque tal estrategia no generaría ningún desperdicio en absoluto.

Sin embargo, consideraciones relacionadas con la informática muestran que una versión de la conexión pensamiento-entropía-calor que impulsó nuestro análisis inicial permanece intacta, sólo que tiene un sabor ligeramente diferente. Los resultados muestran que si un ordenador *borra* cualquiera de sus bancos de memoria, se produce necesariamente calor residual. (Recordemos que el calor residual se produce generalmente por procesos que son difíciles de revertir, como destrozar un vidrio; borrar los datos hace difícil revertir un cálculo y por lo tanto no es particularmente sorprendente que los borrados produzcan calor). [38] Teniendo esto en cuenta, nuestro consejo al Pensador sólo necesita una suave modificación. El Pensador *puede* pensar sin necesidad de purgar el calor siempre y cuando no borre nunca un recuerdo. Pero suponiendo que el Pensador sea de alcance finito, tendrá una capacidad de memoria finita que tarde o temprano se llenará hasta su límite. Una vez que lo haga, todo lo que el Pensador puede hacer internamente es reorganizar la información fija que tiene en la memoria, rumiando interminablemente sobre viejos pensamientos, no una versión de la inmortalidad que muchos de nosotros elegiríamos. Si el Pensador quiere tener la capacidad creativa de pensar nuevos pensamientos, de establecer nuevos recuerdos, de explorar nuevos terrenos intelectuales, entonces tendrá que permitir borrones, produciendo así calor y llevándonos de vuelta a la situación discutida en la sección anterior y a la estrategia de hibernación allí recomendada.

El segundo desarrollo es más apremiante. El descubrimiento de que la expansión del espacio se está acelerando plantea un nuevo y posiblemente insuperable obstáculo para la reflexión sin fin. [39] Si, como los datos actuales sugieren, la expansión acelerada continúa sin cesar, entonces, como nos encontramos en el piso 12, las galaxias distantes desaparecerán como si hubieran caído sobre un acantilado en el borde del espacio. Es decir, estamos rodeados por un lejano horizonte esférico que marca el límite de lo que, incluso en principio, podemos ver. Todo lo que está más lejos del límite se aleja de nosotros a una velocidad superior a la de la luz, por lo que cualquier luz emitida desde esas distancias nunca nos alcanzará. Los físicos llaman al límite distante nuestro horizonte *cosmológico.*

Puedes imaginar el lejano horizonte cosmológico como una enorme esfera brillante, muy parecida a un conjunto esférico de lámparas de calor distantes que genera una temperatura de fondo en el espacio. Explicaré por qué esto está en el próximo capítulo (está estrechamente relacionado con la física de los agujeros negros, que también tienen horizontes resplandecientes, como descubrió Stephen Hawking), pero aquí permítanme subrayar que la temperatura del horizonte cosmológico resplandeciente es completamente distinta de la temperatura de fondo de microondas de 2,7 kelvin que quedó del big bang. Con el tiempo, la temperatura de fondo de las microondas continuará enfriándose, acercándose al cero absoluto a medida que el espacio continúe expandiéndose y la radiación de microondas continúe diluyéndose en intensidad. La temperatura que surge del

horizonte cosmológico se comporta de manera diferente. Es constante. Es diminuta, basada en la tasa medida de expansión acelerada, es de unos $^{10-30}$ kelvin, pero es duradera. Y a largo plazo, la resistencia importa.

El calor sólo fluye espontáneamente de las cosas que están más calientes a las que están más frías. Cuando la temperatura del Pensador es más alta que la del universo, tiene la oportunidad de irradiar su calor residual al espacio. Pero si la temperatura del Pensador disminuyera por debajo de la del espacio, el calor fluiría en la otra dirección, desde el espacio hacia el Pensador, lo que provocaría la necesidad del Pensador de expulsar su calor residual. Esto implica que la estrategia de hibernación está destinada a fracasar. A medida que el Pensador continúa disminuyendo su temperatura (que, recuerde, es lo que le permite seguir pensando indefinidamente con un presupuesto energético finito), tarde o temprano alcanzará el diminuto valor de $^{10-30}$ kelvin. En ese punto, se acabó el juego. El universo no aceptará sus residuos. Un pensamiento más (o, más precisamente, una borradura más) y el Pensador se frita.

La conclusión se basa en la suposición de que la expansión acelerada del espacio persistirá sin cambios. Nadie sabe si este será el caso. La aceleración podría aumentar, impulsándonos hacia un gran desgarro, disminuyendo aún más las perspectivas de vida y pensamiento. O podría disminuir. Eso evitaría un horizonte cosmológico, apagaría las lejanas lámparas de calor y permitiría que la temperatura del universo disminuyera indefinidamente. Como demostraron los físicos Will Kinney y Katie Freese, esta posibilidad cosmológica restablecería el optimismo original de Dyson, permitiendo al Pensador, siguiendo diligentemente el programa de hibernación, continuar pensando indefinidamente en el futuro.[40]

Lejos de mi intención disminuir un solitario rayo de esperanza para el futuro del pensamiento, pero es útil para recapitular donde están las cosas. Toda nuestra cadena de razonamiento está forjada en el optimismo. En un universo que puede carecer de todo, desde estrellas y planetas hasta moléculas y átomos, hemos asumido que el Pensador puede existir. Mientras que las partículas elementales estables, como los electrones, neutrinos y fotones, se moverán, se necesita una imaginación de color rosa para que el ojo de la mente imagine que las recoge y produce una estructura pensante. Sin embargo, para tener una mente lo más amplia posible, hemos asumido que tal entidad puede formarse. Y seguramente es gratificante saber que si el universo se expande de la manera correcta, hay al menos una posibilidad de que tales Pensadores puedan pensar indefinidamente. De todos modos, es difícil evitar la conclusión de que el futuro lejano del pensamiento es precario.

De hecho, si la expansión acelerada no disminuye, llegará el momento en que el pensamiento haga su última reverencia. Nuestra comprensión es demasiado burda para hacer una predicción precisa, pero poner números aproximados en las ecuaciones sugiere que esto podría suceder dentro de los próximos 1050 años. Una gran incógnita, como señalamos al principio, es si la vida inteligente será capaz de interceder en el desarrollo cósmico, afectando quizás a la evolución de las estrellas y galaxias, explotando fuentes imprevistas de energía de alta calidad, o incluso controlando la tasa de expansión espacial. Debido a la complejidad de la inteligencia, es imposible pesar con algo más que conjeturas

salvajes, por lo que he elegido evitar por completo tales influencias. Así que, dejando de lado la intervención inteligente y atendiendo diligentemente a la segunda ley de la termodinámica, concluimos que para cuando subamos al piso 50, el universo puede muy bien haber albergado su pensamiento final.

En la mayoría de las escalas que los humanos han contemplado, 1050 años es un lapso espectacularmente largo. Puede acomodar el tramo desde el big bang hasta hoy más de un billón de billones de billones de veces. Sin embargo, cuando se considera desde la escala de tiempo de, digamos, el septuagésimo quinto piso, 1050 años es un lapso muy corto, ridículamente menor, que nuestra experiencia de un tiempo de demora entre el encendido de una lámpara de mesa y la luz que llega a nuestros ojos. Y, por supuesto, si el universo es eterno, cualquier duración, por larga que sea, se registra como infinitesimal. Narrado desde la perspectiva de estas escalas más largas, la contabilidad cosmológica sería así: un momento después del big bang, la vida surgió, contempló brevemente su existencia dentro de un cosmos indiferente, y se disolvió. Es una recapitulación cósmica del lamento de Pozzo mientras se arremete contra los que esperan a Godot, "Dan a luz a horcajadas en una tumba, la luz brilla un instante, y luego es de noche una vez más".

Algunos considerarán que este futuro es sombrío. Incluso con su comprensión más rudimentaria de mediados del siglo XX, Bertrand Russell, cuya evaluación encontramos en el capítulo 2, seguramente lo hizo. Mi punto de vista es diferente. Para mí, el futuro que la ciencia imagina ahora destaca cómo nuestro momento de pensamiento, nuestro instante de luz, es a la vez raro, maravilloso y precioso.

10

EL CREPÚSCULO DEL TIEMPO

Quanta, Probabilidad y Eternidad

Mucho después de que el pensamiento concluya, sin dejar a los seres cogitantes para que se den cuenta, las leyes de la física continuarán haciendo lo que siempre han hecho: delinear el desarrollo de la realidad. A medida que lo hagan, las leyes manifestarán una realización esencial: la mecánica cuántica y la eternidad forman una poderosa unión. La mecánica cuántica es un tipo particular de soñador de ojos estrellados, que permite una vasta colección de futuros posibles, al tiempo que fundamenta su loca visión especificando la probabilidad de cualquier resultado dado. A través de escalas de tiempo conocidas podemos ignorar con seguridad aquellos resultados cuyas probabilidades cuánticas son tan fantásticamente pequeñas que tendríamos que esperar mucho más que la edad actual del universo para tener una posibilidad razonable de encontrarlos. Pero en escalas de tiempo tan vastas que, en comparación, la edad actual del universo es evanescente, muchas posibilidades que antes podíamos dejar de lado ahora requieren la debida consideración. Y si realmente no hay una fecha final para el tiempo, entonces todos y cada uno de los resultados no estrictamente prohibidos por las leyes cuánticas, familiares de extraños, probablemente inverosímiles, pueden estar seguros de que tarde o temprano se les dará su momento para brillar.[1]

En este capítulo, examinaremos un puñado de estos raros procesos cosmológicos, esperando su momento, esperando ser tocados en el hombro y llamados a entrar en la realidad.

La desintegración de los agujeros negros

A mediados del siglo XX, con su papel decisivo en los últimos episodios de la Segunda Guerra Mundial, los físicos gozaron de una notable prominencia. Las áreas de investigación dominantes eran la física nuclear y de partículas, investigaciones que en palabras de Freeman Dyson habían dotado a los físicos de los poderes aparentemente divinos para

"liberar esta energía que alimenta a las estrellas... para elevar un millón de toneladas de roca al cielo". [2] La relatividad general, por el contrario, fue ampliamente vista como una disciplina de nicho que ya había vivido sus días de gloria. El físico John Wheeler cambiaría eso. Las contribuciones de Wheeler a la física nuclear y cuántica fueron numerosas e influyentes, pero tenía un afecto permanente por la teoría general de la relatividad. También tenía un extraño don para inspirar a otros con su entusiasmo. Durante las décadas siguientes, Wheeler entrenaría a algunos de los físicos más magistrales del mundo, que trabajarían con él para restablecer la relatividad general como un vibrante campo de investigación científica.

Los agujeros negros eran una fascinación particular para Wheeler. Según la relatividad general, una vez que algo cae dentro de un agujero negro no puede escapar. Ya no está. Permanentemente. Pensando en esto a principios de los 70, Wheeler fue llevado a un rompecabezas que mencionó a su estudiante Jacob Bekenstein. Los agujeros negros parecían ofrecer una estrategia preparada para violar la segunda ley de la termodinámica. Tome una taza de té caliente, meditó Wheeler, y arrójela a un agujero negro cercano. ¿A dónde va la entropía del té? Como el interior de un agujero negro es permanentemente inaccesible para los que están fuera, el té caliente, junto con su entropía, parece haber desaparecido. A Wheeler le preocupaba que la eliminación de la entropía en un agujero negro proporcionara un medio fiable para violar voluntariamente la segunda ley.

Después de unos meses, Bekenstein volvió a Wheeler con una resolución. La entropía del té no ha desaparecido, declaró. La entropía simplemente se ha transferido al agujero negro. De la misma manera que agarrar una sartén caliente transfiere parte de la entropía de la sartén a la mano, Bekenstein sugirió que cualquier cosa que caiga en un agujero negro transfiere su entropía al propio agujero negro.

Es una respuesta natural, una que también se le ocurrió a Wheeler. [3] Sin embargo, inmediatamente se convierte en un problema. La entropía, como hemos visto, cuenta el número de reordenamientos de los componentes de un sistema que lo dejan "más o menos igual". O, más precisamente, la entropía cuenta las distintas configuraciones de los componentes microscópicos de un sistema que son compatibles con su estado macroscópico. Si el té transfiere su entropía al agujero negro, la entropía debería aparecer como un aumento en el número de reordenamientos internos del agujero negro que no tienen ningún efecto en las características macroscópicas del agujero negro.

Este es el problema: A finales de los años 60 y principios de los 70, los físicos Werner Israel y Brandon Carter utilizaron las ecuaciones de la relatividad general para mostrar que un agujero negro está totalmente determinado por sólo tres números: la masa del agujero negro, el momento angular del agujero negro (la velocidad a la que gira) y la carga eléctrica del agujero negro. [4] Una vez que se han medido estas características macroscópicas, se tiene toda la información necesaria para describir completamente el agujero negro. Lo que significa que dos agujeros negros cualesquiera con las mismas características macroscópicas -la misma masa, el mismo momento angular y la misma carga eléctrica- son idénticos, hasta el último detalle. Así que a diferencia de una colección de centavos en la que especificar, digamos, treinta y ocho cabezas y sesenta y dos colas permite miles de millones y miles de millones de configuraciones diferentes de las monedas, y a diferencia

de un contenedor de vapor en el que especificar el volumen, la temperatura y la presión permite un número gigantesco de configuraciones distintas de las moléculas, cuando se trata de agujeros negros, especificar la masa, el momento angular y la carga eléctrica apunta rígidamente a una y sólo una configuración. Sin otras configuraciones que contar, ni semejantes que enumerar, parecería que los agujeros negros no llevan ninguna entropía en absoluto. Si se añade una taza de té, aparentemente su entropía se desvanecerá. Cuando se enfrenta a un agujero negro, la segunda ley de la termodinámica parece capitular.

Bekenstein no tendría nada de eso. Los agujeros negros, proclamó, tienen entropía. Además, cuando algo cae, la entropía de los agujeros negros aumenta de la manera adecuada para hacer que el mundo sea seguro para la segunda ley. Para entender el razonamiento de Bekenstein, hay que tener en cuenta que cuando algo cae en un agujero negro, su masa no se pierde. Todos los que estudiaron y entendieron la relatividad general estuvieron de acuerdo en que cualquier cosa que caiga en ella se muestra como un aumento de la masa del propio agujero negro. Para visualizar el proceso, imagine el horizonte de sucesos de un agujero negro, la superficie esférica que define el límite del agujero negro, marcando lugares más allá de los cuales no hay vuelta atrás. Las matemáticas muestran que el radio del horizonte de sucesos es proporcional a la masa del agujero negro: menos masa implica un horizonte más pequeño, más masa un horizonte más grande. Cuando tiras algo dentro, la masa del agujero negro aumenta, y por lo tanto deberías imaginar su horizonte expandiéndose hacia afuera en respuesta. El agujero negro come y su cintura esférica se ensancha.

Siguiendo el espíritu del enfoque de Bekenstein[5], imagínese ahora lanzando una sonda particularmente especial, una cuidadosamente diseñada para examinar cómo un agujero negro responde a la entropía. Para ello, preparamos un solo fotón cuya longitud de onda es tan larga -cuyas posibles ubicaciones están tan dispersas- que cuando se encuentra con el agujero negro, la descripción más precisa que podemos dar del resultado se expresa con una sola unidad de información: o el fotón cayó en el agujero negro o no lo hizo. Por diseño, la posición del fotón es tan nebulosa que si es capturado por el agujero negro no podemos dar una descripción más detallada como especificar que el fotón entró en el agujero negro a través de este o aquel punto del horizonte. Tal fotón lleva una sola unidad de entropía y así nos permite examinar matemáticamente cómo responde el agujero negro cuando come una sola comida de entropía.

Puesto que el fotón tiene energía, y puesto que la energía y la masa son dos caras de la misma moneda einsteniana (de $E = mc2$), si el agujero negro consume el fotón, su masa aumenta ligeramente y su horizonte de sucesos se expande ligeramente. Pero la recompensa está en los detalles. Bekenstein notó un patrón crucial: al arrojar una unidad de entropía, el horizonte de sucesos del agujero negro se expandiría en una unidad de área (la llamada *unidad de área cuántica* o *área de Planck*, que es de unos 10^{-70} metros cuadrados).[6] Si se añaden dos unidades de entropía, el área de la superficie crecería en dos unidades de área. Y así sucesivamente. La superficie del horizonte de sucesos del agujero negro parece así seguir la pista de la entropía que el agujero negro ha ingerido. Bekenstein elevó el patrón a una propuesta: *la entropía total de un agujero negro viene dada por el área total de su*

horizonte de sucesos (medida en unidades de Planck). Esta fue la nueva idea que Bekenstein le dio a Wheeler.

Bekenstein no pudo explicar el sorprendente vínculo entre la entropía de un agujero negro y su superficie exterior, su horizonte de sucesos; el vínculo es inesperado porque la entropía de un objeto ordinario, como la taza de té, está contenida en su interior, su volumen. Bekenstein tampoco pudo explicar cómo se relacionaba su propuesta con el marco convencional en el que la entropía debería enumerar los posibles reordenamientos de los ingredientes microscópicos de un agujero negro (una cuestión que permanecería mayormente inactiva hasta mediados del decenio de 1990, cuando la teoría de las cuerdas proporcionaría una perspectiva). Pero como un dispositivo de contabilidad, su propuesta ofrecía una forma cuantitativa de rescatar la segunda ley de la termodinámica. La solución es inmediata: al rastrear la entropía total, hay que contar no sólo las contribuciones de la materia y la radiación, sino también las contribuciones de los agujeros negros. Tirar el té en un agujero negro reduce la entropía en la mesa del desayuno, pero si se calcula el aumento de la superficie del horizonte de sucesos del agujero negro, se dará cuenta de que la disminución entrópica que se disfruta en casa se compensa con el aumento entrópico del propio agujero negro. Al proporcionar un algoritmo para incluir los agujeros negros en la contabilidad de la entropía, Bekenstein dio la vuelta a la segunda ley, permitiéndole una vez más caminar con la cabeza en alto.

Cuando Stephen Hawking se enteró de la propuesta de Bekenstein, la consideró ridícula. Muchos otros físicos tenían una opinión similar. Totalmente determinados por sólo tres números y consistentes en su mayoría de espacio vacío (todo lo que cae en un agujero negro se dibuja implacablemente hacia su singularidad central), los agujeros negros habían adquirido un aura de total simplicidad. La opinión, en términos generales, era que los agujeros negros no pueden llevar el desorden porque no hay nada dentro de ellos que pueda ser desordenado. Liderando la acusación contra la propuesta de Bekenstein, Hawking lanzó sus propios cálculos usando una delicada combinación de los métodos matemáticos de la relatividad general y la mecánica cuántica, que anticipó que revelaría rápidamente una falacia en el razonamiento de Bekenstein. En cambio, los cálculos llevaron a Hawking a una conclusión tan chocante que le llevó algún tiempo creerla. El análisis de Hawking no sólo confirmó el de Bekenstein, sino que también reveló sorpresas complementarias: los agujeros negros tienen una *temperatura* y los agujeros negros brillan. Irradian. Los agujeros negros son negros sólo de nombre. O, dicho más precisamente, los agujeros negros son negros sólo si se ignora la física cuántica.

Brevemente, aquí está la esencia del razonamiento de Hawking.

Según la mecánica cuántica, cualquier pequeña región del espacio siempre albergará actividad cuántica. Incluso si la región parece vacía, aparentemente sin energía, la teoría cuántica muestra que su contenido de energía fluctúa rápidamente hacia arriba y hacia abajo, produciendo energía cero sólo en promedio. Se trata del mismo tipo de fluctuaciones cuánticas que dieron lugar a las variaciones de temperatura en la radiación cósmica de fondo de microondas que encontramos en el capítulo 3. A través de $E = mc2$, tales fluctuaciones de energía cuántica también pueden aparecer como fluctuaciones de masa cuántica - las partículas y sus compañeros antipartículas aparecen en el espacio vacío. Esto

está ocurriendo ahora mismo delante de tus ojos, pero por mucho que mires fijamente no verás ninguna evidencia de ello. La razón es que la mecánica cuántica también dicta que tales pares de partículas y antipartículas se encuentran rápidamente, se aniquilan y se desvanecen en el espacio vacío. Detectamos firmas indirectas de estas maquinaciones efímeras porque es sólo cuando las incluimos en nuestros cálculos que alcanzamos el asombroso acuerdo entre las predicciones y las medidas que ha hecho justificadamente de la mecánica cuántica la pieza central de la física fundamental.[7]

Hawking revisó estos procesos cuánticos, pero ahora se imaginó que tenían lugar justo fuera del horizonte de sucesos de un agujero negro. Cuando un par de partículas-antipartículas aparece en este entorno, a veces las dos partículas se aniquilan rápidamente, como lo harían en cualquier otro lugar. Pero, y este es el punto, Hawking se dio cuenta de que en ocasiones no se aniquilan. A veces un miembro del par es absorbido por el agujero negro. La partícula sobreviviente, ahora sin un compañero con el cual aniquilar (y con la tarea de conservar el impulso total), gira la cola y se precipita hacia afuera. Con esto sucediendo repetidamente en cada diminuta región del espacio a lo largo de la superficie del horizonte esférico del agujero negro, el agujero negro parecerá irradiar partículas en todas las direcciones, lo que ahora llamamos *radiación Hawking.*

Además, según los cálculos, cada una de estas partículas que cae en el agujero negro tiene energía *negativa* (quizás no sea sorprendente, dado que la partícula compañera que escapa del agujero tiene energía positiva, y la energía total debe ser conservada). Como el agujero negro consume estas partículas de masa negativa, es como si estuviera comiendo calorías negativas, lo que hace que su masa baje, no suba. Visto desde el exterior, el agujero negro parece encogerse constantemente mientras irradia partículas. Si no fuera porque la fuente de la radiación es exótica -un agujero negro inmerso en el baño cuántico de partículas fluctuantes inherentes al espacio vacío- el proceso parecería totalmente peatonal, como un trozo brillante de carbón que irradia fotones mientras se desgasta lentamente.[8]

Así como un agujero negro en crecimiento, ya sea consumiendo té caliente o estrellas turbulentas, se ajusta plenamente a la segunda ley de la termodinámica, así también para un agujero negro en disminución. La disminución del área del horizonte de sucesos de un agujero negro en disminución significa que su propia entropía disminuye, pero la radiación que el agujero negro emite, que fluye hacia el exterior y se extiende a través de una extensión espacial cada vez más amplia, transfiere un alijo de entropía más que compensado al medio ambiente. La coreografía es familiar: mientras los agujeros negros irradian, bailan el doble paso de la entropía.

El resultado de Hawking hizo todo esto matemáticamente preciso. Entre otras cosas, descubrió una fórmula precisa para la temperatura de un agujero negro brillante. Daré una explicación cualitativa de su resultado en la siguiente sección (y para los matemáticamente inclinados, la fórmula está en las notas [9]), pero la característica más relevante para nosotros aquí es que la temperatura es *inversamente proporcional* a la masa del agujero negro. Así como los grandes daneses maduros son grandes y suaves mientras que los cachorros de shih tzu son pequeños y maniáticos, los grandes agujeros negros son tranquilos y fríos mientras que los pequeños agujeros negros son frenéticos y calientes. Algunos números, cortesía de

la fórmula de Hawking, lo hacen explícito. Para un gran agujero negro, como el que está en el centro de nuestra galaxia con cuatro millones de veces la masa del sol, la fórmula de Hawking fija su temperatura en el diminuto valor de una centésima de una trillonésima de grado sobre el cero absoluto (10^{-14} kelvin). Para un agujero negro más pequeño, con la masa del sol, la temperatura es más alta, pero no es nada agradable, sólo a una décima de millonésima de grado (10^{-7} kelvin). Un pequeño agujero negro, con la masa, digamos, de una naranja, estaría ardiendo con una temperatura de alrededor de un trillón de trillones de grados (1024 kelvin).

Un agujero negro cuya masa es mayor que la de la luna tiene una temperatura inferior a la de la radiación de fondo de microondas de 2,7 grados que actualmente impregna el cosmos. Práctico para la charla de un cóctel erudito, es un dato numérico de importancia cosmológica. Debido a que el calor fluye espontáneamente de temperaturas más altas a más bajas, el calor fluirá desde el frígido entorno lleno de microondas que rodea a tal agujero negro hasta el propio agujero negro aún más frígido. Aunque el agujero negro emite radiación de Hawking, en conjunto tomará más energía de la que libera, aumentando lentamente su peso. Debido a que incluso los agujeros negros más pequeños descubiertos hasta ahora por las observaciones astronómicas son mucho más masivos que la Luna, todos están en proceso de hincharse. Sin embargo, a medida que el universo continúe expandiéndose, la radiación de fondo de microondas continuará diluyéndose y su temperatura seguirá enfriándose. En un futuro lejano, cuando la temperatura de fondo del espacio caiga por debajo de la de cualquier agujero negro, el balancín de energía girará, el agujero negro emitirá más de lo que recibe, y empezará a encogerse como resultado.

En la plenitud de los tiempos, los agujeros negros también se desvanecerán.

Hay muchas preguntas sobre los agujeros negros que siguen estando en la vanguardia de la investigación contemporánea, y una de considerable importancia para nuestra discusión aquí se refiere a los momentos finales de la existencia de un agujero negro. A medida que un agujero negro se irradia, su masa disminuye y, a su vez, su temperatura aumenta. ¿Qué sucede cuando el agujero negro casi desaparece, cuando su masa se acerca a cero y su temperatura se eleva hacia el infinito? ¿Explotará? ¿Se emite un chispazo? ¿Algo más? No lo sabemos. Aún así, la comprensión cuantitativa de la radiación de Hawking permitió al físico Don Page determinar la velocidad a la que un agujero negro dado se encoge y por lo tanto el tiempo que tardará en llegar a su momento final, sean cuales sean los detalles de ese momento. [10] Tomando la masa del sol como representativa de esos agujeros negros que se forman a partir de una estrella moribunda, el resultado de Page muestra que alrededor del piso 68 del Empire State Building, 1068 años después del estallido, tales agujeros negros habrán irradiado.

La desintegración de los agujeros negros extremos

Los agujeros negros que se cree que habitan en el centro de la mayoría de las galaxias, si no todas, tienen masas gigantescas. A medida que los estudios astronómicos han progresado, cada poseedor de un récord ha sido desbancado por el siguiente, con masas campeonas que se dirigen a cien mil millones de veces la del sol. Un agujero negro de esa masa tiene un

horizonte de sucesos tan grande que se extendería desde el sol más allá de la órbita de Neptuno y un camino justo hacia la nube de Oort. Incluso si estás un poco oxidado en Oort y su nube distante, sólo debes saber que la luz del sol tarda más de cien horas en llegar a ella, así que estamos hablando de un agujero negro con una extensión monstruosa. Pero como explicaré ahora, el enorme tamaño de estos agujeros negros oculta su plácido comportamiento.

Según la relatividad general, la receta para construir un agujero negro es muy simple: reunir cualquier cantidad de masa y formar una bola de un tamaño suficientemente pequeño. [11] Por supuesto, incluso una familiaridad pasajera con los agujeros negros te lleva a esperar que "suficientemente pequeño" significa *realmente* pequeño, *espectacularmente pequeño*, *ridículamente pequeño*. Y en algunos casos tu expectativa está en el blanco. Para convertir un pomelo en un agujero negro, necesitarías apretarlo hasta unos 10-25 centímetros de diámetro; para convertir la tierra en un agujero negro necesitarías apretarlo hasta unos dos centímetros de diámetro; y para el sol, necesitarías apretarlo hasta unos seis kilómetros de diámetro. Cada ejemplo requiere un fantástico aplastamiento de materia, contribuyendo a la extendida intuición de que para formar un agujero negro se necesitan densidades estupendas. Pero si continuaras catalogando ejemplos más allá de la masa del sol, centrándote en la formación de agujeros negros cada vez más grandes, te encontrarías con un patrón que te sorprendería.

A medida que aumenta la cantidad de materia utilizada para crear un agujero negro, la densidad requerida a la que debe ser aplastada esa materia disminuye. Si nos permitimos una, bueno dos, frases matemáticas, la razón es inmediatamente evidente: Porque el radio del horizonte de sucesos de un agujero negro se escala con su masa, su volumen se escala como masa al cubo, y así la densidad media-masa por volumen-gotas con la masa al cuadrado. Aumenta la masa en un factor de dos y la densidad cae en un factor de cuatro; aumenta la masa en un factor de mil y la densidad cae en un factor de un millón. Matemáticamente, el punto cualitativo es que al formar un agujero negro, cuanto más grande es la masa, menos necesita ser aplastada. Para construir un agujero negro como el del centro de la Vía Láctea, cuya masa es unas cuatro millones de veces la del sol, se necesita materia cuya densidad sea unas cien veces la del plomo, por lo que todavía se tiene que aplastar mucho. Para construir uno con una masa cien millones de veces la del sol, la densidad necesaria desciende hasta la del agua. Y para construir uno con cuatro mil millones de veces la masa del sol, la densidad necesaria está a la par con la del aire que respiras ahora. Reúne cuatro mil millones de veces la masa del sol en el aire, y a diferencia del caso de un pomelo, o la tierra, o el sol, para crear un agujero negro no necesitarías exprimir el aire en absoluto. La gravedad que actúa en el aire formaría un agujero negro por sí misma.

No abogo por las bolsas de aire como materia prima realista para crear agujeros negros supermasivos, pero el hecho de que un agujero negro que pesa cuatro mil millones de veces más que el sol tenga una densidad media de aire es notable, y una ilustración reveladora de cómo las propiedades de los agujeros negros pueden diferir de las concepciones populares. [12] Gigantescos cuando se evalúan por su masa y tamaño, tales agujeros negros son delicados

cuando se evalúan por su densidad media, lo que los convierte en gigantes decididamente suaves. En este sentido, los agujeros negros más grandes son menos extremos que los más pequeños, una comprensión que da una explicación intuitiva del hallazgo de Hawking de que cuanto más masivo es el agujero negro, más baja es su temperatura y más atenuado su brillo.

La longevidad de los grandes agujeros negros se beneficia, por lo tanto, de dos factores relacionados: tienen más masa para irradiar y, con sus temperaturas más bajas, irradian esa masa más lentamente. Si añadimos números a las ecuaciones, encontramos que un agujero negro cuya masa es aproximadamente cien mil millones de veces la del sol se marchitará a un ritmo tan lento que sólo cuando lleguemos al último piso del Empire State Building, el piso 102, dicho agujero negro arrojará su última ráfaga de radiación y finalmente, verdaderamente, se desvanecerá en negro.[13]

El fin del tiempo

Mirando el universo desde el piso 102, no veremos mucho más allá de una neblina difusa de partículas que vuelan por el espacio. Ocasionalmente, la atracción entre un electrón y su antipartícula, el positrón, las acercará cada vez más a lo largo de las trayectorias en espiral hacia el interior hasta que se aniquilen en un pequeño destello, un pinchazo de luz que penetra momentáneamente en la oscuridad. Si la energía oscura se ha agotado y la rápida expansión del espacio ha disminuido, es posible que las partículas se acumulen en agujeros negros aún más grandes que irradiarán aún más lentamente, dando lugar a vidas aún más largas. Pero si la energía oscura persiste, las partículas se separarán cada vez más rápidamente por la expansión acelerada, asegurando que rara vez, si es que alguna vez, se encuentren unas con otras. Curiosamente, las condiciones tienen una afinidad con aquellas justo después del big bang, cuando el espacio también estaba poblado de partículas separadas. La diferencia es que en el universo temprano, las partículas eran tan densas que la gravedad las engatusó fácilmente para que se convirtieran en estructuras como estrellas y planetas, mientras que en el universo posterior, las partículas se dispersarán tan ampliamente y la expansión acelerada del espacio será tan implacable que tal aglomeración será extraordinariamente improbable. Es una versión cósmica de polvo a polvo, con el polvo primitivo preparado para bailar el paso doble entrópico, siendo impulsado por la gravedad hacia estructuras astronómicas ordenadas, mientras que el polvo posterior, esparcido tan finamente, se contentará con vagar tranquilamente a través del vacío.

Los físicos a veces comparan esta era futura con el fin del tiempo. No es que el tiempo se detenga. Pero cuando la acción no es más que una partícula aislada que se mueve desde este punto en los vastos alcances del espacio hasta ese punto, es razonable concluir que el universo finalmente ha hecho la transición al olvido. Sin embargo, nuestra voluntad en este capítulo de considerar duraciones aún más largas eleva la relevancia de procesos tan improbables que de otro modo serían sumariamente descartados. A pesar de que son apenas concebibles, estos raros eventos pueden puntuar el olvido con posibilidades poco frecuentes pero de gran alcance.

La desintegración del vacío

En una conferencia de prensa el 4 de julio de 2012, celebrada en el CERN, el Centro Europeo de Investigación Nuclear, el portavoz Joe Incandela anunció el descubrimiento de la largamente buscada partícula Higgs. Estaba viendo la transmisión en vivo en el Aspen Center for Physics en una sala llena de colegas. Eran cerca de las dos de la mañana. Todo el mundo estalló en una ovación salvaje. La cámara se dirigió a Peter Higgs, quitándose las gafas y limpiándose los ojos. Higgs había propuesto la partícula que llevaba su nombre casi cincuenta años antes, había luchado con éxito contra la resistencia que las ideas desconocidas a veces encuentran, y había esperado toda una vida para aprender que tenía razón.

En un largo paseo por las afueras de Edimburgo, un joven Peter Higgs resolvió un rompecabezas que había frustrado a los investigadores de todo el mundo. Las matemáticas para describir las fuerzas fuertes, débiles y electromagnéticas, así como las partículas de materia sobre las que influyen estas fuerzas, se estaban uniendo rápidamente. Trabajando hombro con hombro, los teóricos y experimentadores escribían un manual de mecánica cuántica que exponía el funcionamiento del micromundo. Pero había una omisión flagrante. Las ecuaciones no podían explicar cómo las partículas fundamentales adquirían masa. ¿Por qué es que si empujas las partículas fundamentales (como los electrones o los quarks), sentirías que las partículas se resisten a tu esfuerzo? Esta resistencia refleja la masa de la partícula, pero las ecuaciones parecían contar una historia diferente: de acuerdo con las matemáticas, las partículas no deberían tener masa y por lo tanto no deberían ofrecer ninguna resistencia. No hace falta decir que el desajuste entre la realidad y las matemáticas estaba volviendo locos a los físicos.

La razón por la que las matemáticas parecían sólo admitir partículas sin masa es una técnica de toque, pero se reduce a la simetría. De la misma manera que una bola blanca se ve igual que si la giras de esta manera y de aquella otra, las ecuaciones que describen las partículas fundamentales se ven igual que si intercambias este término matemático con ese otro. En cada caso, la insensibilidad al cambio de orientación de la bola blanca y al reordenamiento matemático de las ecuaciones, refleja un alto grado de simetría subyacente. Para la bola blanca, la simetría asegura que ruede suavemente. Para las ecuaciones, la simetría asegura que el análisis matemático se desenvuelva suavemente. Como los investigadores de la física de partículas se han dado cuenta, sin la simetría las ecuaciones serían inconsistentes, produciendo tonterías similares al resultado de dividir uno por cero. De ahí el enigma: el análisis reveló que la misma simetría matemática que asegura unas ecuaciones sanas también requiere partículas sin masa (tal vez no sea sorprendente, ya que el cero es en sí mismo un número altamente simétrico, que se mantiene firme en su valor cuando se multiplica o se divide por cualquier otro número).

Ahí es donde entró Higgs. Argumentó que, intrínsecamente hablando, las partículas no *tienen masa*, tal como lo requieren las prístinas ecuaciones simétricas. Sin embargo, Higgs continuó, cuando se empuja al mundo, las partículas adquieren masa a través de una influencia ambiental. Higgs imaginó que el espacio se llena de una sustancia invisible, ahora llamado el campo de *Higgs*, y que las partículas empujadas a través del campo

experimentan una fuerza de arrastre como la que experimenta una bola Wiffle volando por el aire. Aunque una pelota de Wiffle no pesa casi nada, si la sostienes fuera de la ventana de un coche que acelera a velocidades cada vez más altas, tu mano y tu brazo se ejercitarán: la pelota de Wiffle se siente masiva porque está arando a través de la resistencia ejercida por el aire. De manera similar, Higgs propuso, cuando empujas una partícula se siente masiva porque está arando a través de la resistencia ejercida por el campo de Higgs. Cuanto más fuerte es una partícula, más se resiste a su empuje, lo que según Higgs significa que la partícula experimenta una mayor resistencia de su campo espacial.[14]

Si no está ya familiarizado con la noción del campo de Higgs, pero ha leído diligentemente los capítulos anteriores, la idea puede no sonar particularmente exótica. La física moderna se ha acostumbrado a la idea de las sustancias invisibles que inundan el espacio, versiones actuales del antiguo éter. Desde el campo de inflado que puede haber impulsado el big bang hasta la energía oscura que puede ser responsable de la expansión acelerada del universo que ahora se mide, los físicos de las últimas décadas no han sido tímidos a la hora de proponer que el espacio está lleno de cosas invisibles. Pero en los años 60, la idea era radical. Higgs sugería que si el espacio estuviera realmente vacío en el sentido convencional e intuitivo, las partículas no tendrían masa alguna. Así, concluyó que el espacio no debe estar vacío, y la sustancia peculiar que alberga debe ser la adecuada para imbuir a las partículas de su masa evidente.

El primer documento en el que Higgs presentó el caso de esta nueva propuesta fue rechazado de plano. "Se me dijo que estaba diciendo tonterías", Higgs recordó la reacción.[15] Pero aquellos que estudiaron cuidadosamente la idea se dieron cuenta de sus méritos y poco a poco fue ganando terreno. En última instancia, fue aceptada plenamente. Me encontré por primera vez con la propuesta de Higgs en un curso de postgrado en la década de 1980, y se presentó con tal certeza que durante un tiempo no me di cuenta de que la propuesta aún tenía que ser confirmada experimentalmente.

La estrategia para probar la propuesta es tan fácil de describir como difícil de llevar a cabo. Cuando dos partículas, digamos dos protones, se chocan a alta velocidad, la colisión debería sacudir el campo de Higgs circundante. En ocasiones, esto teóricamente liberaría una pequeña gota del campo, que aparecería como un nuevo tipo de partícula elemental - una partícula de *Higgs - lo que* el premio Nobel Frank Wilczek llama un "chip del viejo vacío". Un avistamiento de esta partícula proporcionaría así el arma humeante de la teoría, un objetivo que inspiró más de treinta años de investigación, por parte de más de tres mil científicos, de más de tres docenas de países, utilizando el acelerador de partículas más poderoso del mundo, con un precio que supera los quince mil millones de dólares. La conclusión de esa odisea, anunciada en esa conferencia de prensa del Día de la Independencia, fue señalada por un diminuto bache en un gráfico, por lo demás suave, producido por los datos recogidos en el Gran Colisionador de Hadrones -confirmación experimental de que la partícula Higgs estaba en la mano.

Es un maravilloso episodio en los anales del descubrimiento humano, que profundiza nuestra comprensión de las propiedades de las partículas y refuerza nuestra confianza en la capacidad de las matemáticas para revelar aspectos ocultos de la realidad. La relevancia del

campo de Higgs para nuestro viaje en la línea de tiempo cósmica proviene de una consideración relacionada pero distinta: en algún momento del futuro el valor del campo de Higgs puede cambiar. Y así como la resistencia experimentada por una pelota de Wiffle cambiaría si la densidad del aire que encontrara fuera diferente, las masas de las partículas fundamentales cambiarían si el valor del campo de Higgs que encontraran fuera diferente. Para todos, excepto para el más minúsculo de los cambios, tal cambio casi seguro que destruiría la realidad tal como la conocemos. Los átomos y las moléculas y las estructuras que construyen dependen íntimamente de las propiedades de sus componentes de partículas. El sol brilla por la física y la química del hidrógeno y el helio, que dependen de las propiedades de los protones, neutrones, electrones, neutrinos y fotones. Las células hacen lo que las células hacen principalmente por la física y química de los constituyentes moleculares, que a su vez dependen de las propiedades de las partículas fundamentales. Si cambias las masas de las partículas fundamentales, cambias su comportamiento, y así cambias más o menos todo.

Una gran cantidad de experimentos de laboratorio y observaciones astronómicas han establecido que durante la mayor parte, si no todos, de los últimos 13.800 millones de años, las masas de las partículas fundamentales han sido constantes y, por lo tanto, el valor del campo de Higgs ha sido estable. Sin embargo, incluso si sólo hay una mínima probabilidad de que en el futuro el campo de Higgs pueda saltar a un valor diferente, esa probabilidad se verá amplificada en una certeza cercana por las enormes duraciones que estamos considerando ahora.

La física relevante para un salto de Higgs se llama *tunelización cuántica*, un proceso que se comprende mejor considerándolo primero en un entorno más simple. Coloca una pequeña canica en una flauta de champán vacía, y si nadie la molesta, se espera que la canica permanezca allí. Después de todo, el mármol está rodeado de barreras por todos lados y no tiene suficiente energía para escalar las paredes de cristal y escapar por la parte superior. Tampoco tiene suficiente energía para penetrar directamente a través del vidrio. Del mismo modo, si se coloca un electrón en una trampa con forma de una diminuta flauta de champán, rodeada de barreras en todos los lados, se esperaría que también se mantuviera en su lugar. De hecho, la mayoría de las veces el electrón lo hace. Pero a veces no lo hace. A veces el electrón desaparece de la trampa y se rematerializa fuera de ella.

Por sorprendente que sea un movimiento como el de Houdini para nosotros, en la mecánica cuántica es lo habitual. Usando la ecuación de Schrödinger, podemos calcular la probabilidad de que un electrón se encuentre en tal o cual lugar, como por ejemplo en el interior o exterior de la trampa acanalada. Las matemáticas muestran que cuanto más formidable sea la trampa, más altos y gruesos los lados, menor será la probabilidad de que el electrón se escape. Pero, y esto es clave, para que la probabilidad sea cero, la trampa tendría que ser infinitamente ancha o infinitamente alta, y en el mundo real eso no ocurre. Y una probabilidad distinta de cero, por pequeña que sea, significa que esperando lo suficiente, tarde o temprano el electrón *llegará* al otro lado. Las observaciones confirman que sí. Tal tránsito a través de una barrera es lo que entendemos por "tunelización cuántica".

He descrito el tunelaje cuántico en términos de una partícula que penetra en una barrera, cambiando su ubicación de aquí a allá, pero también puede implicar que un campo penetre en una barrera, cambiando su valor de aquí a allá. Tal proceso, que involucra al campo de Higgs, puede determinar el destino a largo plazo del universo.

En las unidades que los físicos usan convencionalmente, el valor actual del campo de Higgs es 246. [16] ¿Por qué 246? Nadie lo sabe. Pero la fuerza de arrastre reunida por un campo Higgs con este valor (junto con la manera precisa en que cada partícula interactúa con él) explica con éxito las masas de las partículas fundamentales. Pero ¿por qué el valor de Higgs ha sido estable durante miles de millones de años? La respuesta, creemos, es que el valor de Higgs, como el mármol en la flauta o el electrón en la trampa, está rodeado por todos lados por barreras formidables: si el campo de Higgs intentara migrar de 246 a un número mayor o menor, la barrera lo haría regresar a su valor original, al igual que el mármol sería devuelto al fondo de la flauta si alguien agitara momentáneamente el cristal. Y si no fuera por consideraciones cuánticas, el valor del Higgs se mantendría permanentemente en 246. Pero como Sidney Coleman descubrió a mediados de los años 70, el túnel cuántico cambia la historia. [17]

Así como la mecánica cuántica permite que un electrón salga ocasionalmente de una trampa, también permite que el valor del campo de Higgs atraviese una barrera. Si esto ocurriera, el campo de Higgs no cambiaría su valor a través de todo el espacio simultáneamente. En su lugar, en alguna pequeña región señalada por la naturaleza aleatoria de los eventos cuánticos, el Higgs haría su movimiento, haciendo un túnel a través de la barrera a un valor diferente. Entonces, de la misma manera que una canica que hace un túnel a través de una flauta de champán caerá a una altura menor, el valor del campo de Higgs caerá a una energía menor. El señuelo de la menor energía entonces coaccionaría al campo de Higgs en los lugares cercanos para hacer la transición también, un efecto de dominó que daría lugar a una esfera cada vez mayor dentro de la cual el valor de Higgs habría cambiado.

Dentro de esta esfera, el nuevo valor de Higgs causaría que las masas de las partículas cambiaran, por lo que las características familiares de la física, la química y la biología ya no se mantendrían. Fuera de la esfera, donde el valor de Higgs aún no había cambiado, las partículas retendrían sus propiedades habituales, y así todo parecería normal. El análisis de Coleman reveló que el límite de la esfera, marcando la transición del viejo valor de Higgs al nuevo, se extendería hacia afuera a una velocidad muy cercana a la de la luz. [18] Lo que significa que para aquellos de nosotros en el exterior sería virtualmente imposible ver el muro de la perdición acercándose. Para cuando lo viéramos, estaría sobre nosotros. En un momento sería la vida como de costumbre. Al siguiente momento dejaríamos de serlo.
¿Podrían emerger nuevas estructuras y quizás nuevas formas de vida en última instancia en este reino poblado por partículas con propiedades desconocidas? Posiblemente. Pero estas preguntas están actualmente más allá de nuestra capacidad de respuesta.

Los físicos no pueden señalar cuándo el Higgs podría hacer tal salto. La escala de tiempo depende de las propiedades de las partículas y de la fuerza que aún deben ser determinadas con la precisión adecuada. Además, como un proceso cuántico, sólo puede ser predicho probabilísticamente. Los datos actuales sugieren que es probable que el Higgs

haga un túnel a un valor diferente en algún lugar entre ^{10102} y 10359 años a partir de ahora -en algún lugar entre los pisos 102 y 359 (un rango que incluso desafiaría el alcance del Burj Khalifa).[19]

Debido a que el campo de Higgs redefine lo que entendemos por vacío -el más vacío del espacio vacío en cualquier lugar del universo observable contiene el campo de Higgs con el valor 246-, la tunelización cuántica del valor del campo de Higgs revela una inestabilidad del propio espacio vacío. Espera lo suficiente, e incluso el espacio vacío cambiará. Mientras que la escala de tiempo para tal cambio, tal desintegración, da poca causa para la ansiedad, note que hay una posibilidad de que el evento del túnel pueda ocurrir hoy. O mañana. Esa es la carga de vivir en un universo cuántico en el que los eventos futuros se rigen por la probabilidad. Así como se pueden dejar caer unos pocos cientos de peniques y todos aterrizan cabeza abajo -posible pero poco probable- podríamos estar a punto de ser golpeados por un muro de campo de Higgs desplazado que sigue una nueva variedad de espacio vacío a su paso. Posible, pero también improbable.

Que esta probabilidad sea minúscula parece algo bueno. Ser arrastrado por un muro de la fatalidad a la velocidad de la luz, aunque sea rápido e indoloro, es algo que la mayoría de nosotros preferiría evitar. Sin embargo, a medida que prestemos atención a escalas de tiempo aún más largas, nos encontraremos con procesos cuánticos que no sólo son extraños sino que tienen la capacidad de socavar todo lo que consideramos verdadero sobre la realidad. En respuesta, algunos físicos han cultivado una afición por las teorías en las que el universo terminará mucho antes de que tengamos que enfrentarnos a la implosión del propio pensamiento racional.

Cerebros de Boltzmann

A medida que hemos ascendido en la línea de tiempo, hemos sido testigos de la segunda ley de la termodinámica en acción. Desde el big bang hasta la formación de estrellas, el amanecer de la vida, los procesos de la mente, el agotamiento de las galaxias, y a través de la desintegración de los agujeros negros, la entropía ha ido en aumento implacablemente. Este crecimiento constante puede ocultar el hecho de que el decreto de la segunda ley es probabilístico. La entropía *puede disminuir*. Las partículas de aire que actualmente se extienden por toda la habitación *pueden unirse* simultáneamente en una bola que flota cerca del techo, dejándote sin aliento. Es tan improbable, y la escala de tiempo para que suceda es tan enorme, que reconocemos la posibilidad, pero sabiamente seguimos con nuestras vidas. Sin embargo, ya que ahora estamos tomando la visión a largo plazo, vamos a deshacernos de nuestro provincialismo temporal y considerar algunas posibilidades bastante alucinantes de disminución de la entropía.

Imagina que has estado leyendo este libro durante la última hora, sentado en tu silla favorita, y de vez en cuando bebiendo té de tu taza favorita. Si se le pregunta cómo se hizo este acogedor arreglo, diría que compró la taza en Nuevo México a un alfarero local, que heredó la silla de su abuela fraterna, y que siempre ha estado interesado en el funcionamiento del universo, lo que lo llevó a este libro. Si se te anima a dar más detalles,

hablarás de tu educación, tus hermanos, tus padres, etc. Si se te presiona aún más para retroceder en el tiempo y proporcionar un relato más completo, podrías finalmente hablar del mismo material que hemos cubierto en capítulos anteriores.

Todo esto se basa en un hecho curioso: todo lo que sabes refleja pensamientos, recuerdos y sensaciones que *actualmente residen* en tu cerebro. La compra de la taza ha pasado hace mucho tiempo. Lo que queda es una configuración de partículas dentro de tu cabeza que contiene la memoria. Lo mismo ocurre con tus recuerdos de haber heredado la silla de tu abuela, de ser curioso sobre el universo, y de haber leído sobre varios conceptos en este libro. Desde una perspectiva incondicionalmente fisicalista, todo eso está en tu cabeza ahora mismo debido a la particular disposición de las partículas que están en tu cabeza ahora mismo. Lo que significa que si un rocío aleatorio de partículas que revolotean por el vacío de un universo sin estructura y de alta entropía se sumergiera espontáneamente, por casualidad, en una configuración de baja entropía que coincida con la de las partículas que actualmente constituyen su cerebro, ese conjunto de partículas tendría los mismos recuerdos, pensamientos y sensaciones que usted tiene. Ya sea en honor o en reproche, no sé cuáles, tales mentes hipotéticas, flotantes y sin ataduras formadas por la rara pero posible unión espontánea de partículas en una configuración especial y altamente ordenada se han conocido como cerebros de *Boltzmann.*[20]

Solo en la fría oscuridad del espacio, un cerebro de Boltzmann no pensaría muchos pensamientos antes de expirar. Sin embargo, un encuentro espontáneo de partículas también podría dar lugar a accesorios que prolongarían su funcionamiento: el alojamiento de una cabeza y un cuerpo, un suministro de alimentos y agua, una estrella y un planeta adecuados, por mencionar algunos. De hecho, un encuentro espontáneo de partículas (y campos) podría dar lugar a todo el universo actual o recrear las condiciones que desencadenaron el Big Bang, permitiendo que un universo muy parecido al nuestro se desarrolle de nuevo. [21] Hay que admitir que cuando se trata de una caída espontánea de la entropía, las probabilidades favorecen abrumadoramente a las caídas que son más pequeñas: menos partículas que se juntan en estructuras que son más tolerantes a las disposiciones imprecisas. Y por abrumadoramente favorecido, quiero decir *abrumadoramente favorecido*. Exponencialmente favorecidas. Y como tenemos un interés particular en el futuro lejano del pensamiento, un cerebro solitario de Boltzmann es la mínima y por lo tanto la más probable formación aleatoria de partículas que pueden brevemente cerebración y por lo tanto preguntarse cómo en el mundo llegó a ser.[22]

Lo que hace que esto sea más que el comienzo de una trama de ciencia ficción de grado B es que, al mirar hacia el futuro lejano, las condiciones parecen estar maduras para que estos extraños procesos de sonido sucedan realmente. Un ingrediente esencial es la expansión acelerada del espacio. Anteriormente observamos que dicha expansión da como resultado un horizonte cosmológico, una esfera circundante distante que marca el límite más allá del cual los objetos se alejan de nosotros más rápido que la velocidad de la luz, cortando cualquier posibilidad de contacto o influencia. Ahora, de la misma manera que Hawking demostró que la mecánica cuántica implica que un horizonte de agujero negro tiene una temperatura y emite radiación, Hawking y su colaborador Gary Gibbons utilizaron un razonamiento similar para mostrar que un horizonte cosmológico tiene una

temperatura y también emite radiación. Nuestro análisis en el capítulo anterior centrado en el futuro del pensamiento se basó en este mismo hecho, concluyendo que la diminuta temperatura de nuestro horizonte cosmológico, sobre 10^{-30} kelvin, bien podría ser suficiente para causar que los futuros pensadores, tratando desesperadamente de seguir pensando indefinidamente, finalmente se quemen en sus propios pensamientos. Como veremos ahora, en el transcurso de escalas de tiempo mucho más largas, consideraciones similares ofrecen al futuro del pensamiento el potencial para un curioso renacimiento.

En el futuro lejano, la radiación emitida por el horizonte cosmológico proporcionará una fuente tenue pero consistente de partículas (predominantemente partículas sin masa, fotones y gravitones) que vagarán por la región del espacio que rodea el horizonte. En ocasiones, colecciones de estas partículas colisionarán y, vía *E* = *mc2*, transmutarán su energía de movimiento en la producción de un número menor de partículas más masivas como electrones, quarks, protones, neutrones y sus antipartículas. Al dar lugar a menos partículas y menos movimiento, estos procesos disminuyen la entropía, pero si se espera lo suficiente, estas cosas tan poco probables sucederán. Y seguirán ocurriendo. En ocasiones aún más raras, algunos de los protones, neutrones y electrones así producidos se moverán de la forma correcta para unirse a esta o aquella especie atómica. La enorme duración requerida para tales procesos raros explica por qué son irrelevantes en la síntesis de los núcleos atómicos después del big bang o dentro de las estrellas, pero ahora, con tiempo ilimitado en nuestras manos, tales procesos importan. En una expansión temporal aún más larga, los átomos se unirán aleatoriamente en una serie de configuraciones cada vez más complejas, asegurando que de vez en cuando en el camino a la eternidad una colección se unirá a esta o aquella estructura macroscópica - cabeza de chorlito a Bentleys. En ausencia de seres pensantes, todos ellos irán y vendrán sin previo aviso. Pero de vez en cuando la estructura macroscópica formada al azar será un cerebro. Extinto hace tiempo, el pensamiento hará un regreso momentáneo.

¿Cuál es el plazo para tal resurrección? Con un cálculo aproximado (que los entusiastas de las matemáticas pueden encontrar en las notas [23]) podemos estimar que hay una posibilidad razonable de que se forme un cerebro de Boltzmann dentro de 101068 años. Eso es mucho tiempo. Mientras que podríamos escribir la duración representada por el pico del Empire State Building, 10^{102} años, un uno seguido de 102 ceros, en una línea y media, para escribir 101068, que es un 1 seguido de 1068 ceros, podríamos reemplazar cada carácter en cada página de cada libro que se haya impreso y aún así no haríamos ni una abolladura. Aún así, no es como si alguien estuviera merodeando, mirando su reloj, esperando que la gota entrópica se mueva y produzca un cerebro. El universo podría persistir durante casi una eternidad en un estado normal, desordenado y de alta entropía, y nadie se quejaría.

Lo que plantea una interesante y algo personal preocupación. ¿De dónde vino tu cerebro? La pregunta suena tonta, pero sígueme la corriente. Al responder, naturalmente sigues tus recuerdos y conocimientos para explicar que naciste con tu cerebro, y que tu inicio es parte de una secuencia que podemos rastrear a través de tu linaje ancestral, a través del registro evolutivo de la vida, a través de la formación de la tierra, el sol, y así sucesivamente, todo el camino de regreso al big bang. A primera vista, esto parece tener

sentido. La mayoría de nosotros daríamos una versión de la misma respuesta. Pero como los capítulos anteriores dejaron claro, la ventana de tiempo durante la cual los cerebros pueden formarse de la manera que has relatado es limitada, generosamente, el lapso es probable que esté entre los pisos 10 y 40 del Empire State Building. La ventana de tiempo para que los cerebros se formen a la manera de Boltzmanni es incomparablemente más larga, puede ser ilimitada. [24] A medida que el tiempo sigue avanzando, los cerebros de Boltzmann, rara vez pero de manera confiable, seguirán fusionándose, y así el número total de tales cerebros que van y vienen será cada vez mayor. Un estudio de un tramo suficientemente largo en la línea temporal revelaría así que la población total de cerebros de Boltzmann supera con creces la población total de los tradicionales. Lo mismo es cierto incluso si nos centramos sólo en aquellos cerebros de Boltzmann cuyas configuraciones de partículas imprimen la errónea creencia de que surgieron de la manera biológica tradicional. Una vez más, por muy raro que sea un proceso, a lo largo de duraciones arbitrariamente largas ocurrirá arbitrariamente muchas veces.

Si luego se pregunta cuál es la forma más probable en que adquirió las creencias, los recuerdos, el conocimiento y la comprensión que tiene actualmente, la respuesta desapasionada basada en el mero tamaño de la población es clara: su cerebro acaba de formarse espontáneamente a partir de partículas en el vacío, con todos sus recuerdos y otras cualidades neuropsicológicas impresas a través de la configuración particular de las partículas. La historia que has contado de cómo llegaste a ser es conmovedora pero falsa. Sus recuerdos y las diversas cadenas de razonamiento que han llevado a su conocimiento y sus creencias son todos ficticios. No tienes un pasado. Acabas de llegar a la existencia como un cerebro incorpóreo dotado de pensamientos y recuerdos de cosas que nunca ocurrieron.[25]

Más allá de su total extrañeza, este escenario llega con una conclusión devastadora, la misma razón por la que me he centrado en la formación espontánea de cerebros y no en la miríada de otros objetos inanimados que las partículas coalescentes aleatoriamente también pueden realizar. Si un cerebro, el suyo, el mío o el de cualquiera, no puede confiar en que sus recuerdos y creencias sean un reflejo exacto de los acontecimientos que ocurrieron, entonces ningún cerebro puede confiar en las supuestas mediciones y observaciones y cálculos que constituyen la base del entendimiento científico. [26] Tengo recuerdos de haber aprendido relatividad general y mecánica cuántica, puedo pensar a través de la cadena de razonamiento que apoya estas teorías, puedo recordar haber visto los datos y observaciones que estas teorías explican tan impresionantemente, y así sucesivamente. Pero si no puedo confiar en que estos pensamientos fueron impresos por los eventos reales a los que los atribuyo, no puedo confiar en que las teorías son algo más que invenciones mentales, y por lo tanto no puedo confiar en ninguna de las conclusiones a las que apuntan las teorías. Lo más importante, entre tales conclusiones, que ahora se han vuelto poco fiables, es la probabilidad de que yo sea un cerebro creado espontáneamente que flota en el vacío. El profundo escepticismo que surge de la posibilidad de la formación espontánea de un cerebro nos obliga a ser escépticos del mismo razonamiento que nos llevó a considerar la posibilidad en primer lugar.

En resumen, las raras caídas espontáneas de entropía, que están implicadas por las leyes de la física, pueden sacudir nuestra confianza en las leyes mismas y en todo lo que supuestamente implican. Al considerar las leyes que operan sobre duraciones arbitrariamente largas, estamos sumergidos en una pesadilla escéptica, sacudiendo nuestra confianza en todo. No es un lugar feliz para estar. Entonces, ¿cómo podemos recuperar la confianza en los fundamentos del pensamiento racional que han facilitado nuestro vigoroso ascenso al Empire State Building y más allá? Los físicos han desarrollado un número de estrategias.

Algunos concluyen que los cerebros de Boltzmann son mucho ruido y pocas nueces. Claro, esta perspectiva reconoce que los cerebros de Boltzmann pueden formarse. Pero tranquiliza tu mente. Definitivamente no eres uno de ellos. Aquí está cómo probarlo: Mire el mundo y observe todo lo que vea. Si eres un cerebro de Boltzmann, las probabilidades son abrumadoras de que un momento después no existirás. Un cerebro que puede durar más tiempo es un cerebro que es parte de un sistema de apoyo más grande y más ordenado y por lo tanto requiere una fluctuación aún más rara para disminuir la entropía, haciendo su formación mucho más improbable. Así que si tu segunda mirada al mundo se parece mucho a la primera, tu confianza en que no eres un cerebro de Boltzmann aumenta. De hecho, según esta perspectiva, cada próximo momento de tipo similar hace que tu argumento sea más fuerte y tu confianza mayor.

Noten, sin embargo, que el argumento asume que cada uno de los momentos de tal secuencia es, en el sentido convencional, real. Si en este momento usted tiene la memoria de haber mirado al mundo una docena de veces durante el último minuto, asegurándose repetidamente que usted no es un cerebro de Boltzmann, esa memoria refleja el estado de su cerebro en este momento y por lo tanto es compatible con que su cerebro se haya encendido hace un momento con esos mismos recuerdos. Tomando el escenario completamente a pecho, te das cuenta que las observaciones empíricas que solías argumentar que no eres un cerebro de Boltzmann pueden ser en sí mismas parte de la ficción. Puedo tener recuerdos de decirme a mí mismo "Pienso, luego existo", pero visto desde un momento dado, una contabilidad precisa requiere que diga en su lugar, "Creo que pensé, luego creo que fui". En realidad, el recuerdo de tales pensamientos no asegura que los pensamientos hayan sucedido alguna vez.

Un enfoque más convincente es desafiar el propio escenario subyacente: El argumento central de los cerebros de Boltzmann es la existencia de un lejano horizonte cosmológico que irradia continuamente partículas, las materias primas para construir estructuras complejas, incluyendo mentes. A largo plazo, si la energía oscura que llena el espacio se disipara, entonces la expansión acelerada se acercaría a su fin y el horizonte cosmológico se retiraría. Sin una superficie circundante distante que irradie partículas, la temperatura del espacio se acercaría a cero, y con ello la posibilidad de formar espontáneamente estructuras macroscópicas complejas se acercaría también a cero. Todavía no hay pruebas de un debilitamiento (o un fortalecimiento) de la energía oscura, pero las futuras misiones de observación estudiarán la posibilidad con mayor precisión. Una evaluación conservadora es que el jurado aún no ha llegado a un acuerdo.[27]

Más radicales aún son los enfoques en los que el universo, o al menos el universo tal como lo conocemos, simplemente no existirá arbitrariamente en el futuro. En ausencia de las duraciones fantásticamente largas que hemos estado considerando, la probabilidad de que se formen cerebros de Boltzmann se vuelve tan ridículamente diminuta que podemos ignorar el proceso por completo. Si el universo terminara mucho antes de la escala de tiempo que haría probable la producción de cerebros de Boltzmann, podríamos dejar de lado nuestro escepticismo y volver cómodamente a nuestro relato anterior sobre el origen y el desarrollo de nuestros cerebros, incluidos nuestros recuerdos, conocimientos y creencias.[28]

¿Cómo puede ocurrir un final tan rápido del universo?

¿Está cerca el final?

Anteriormente, consideramos la posibilidad de que el campo de Higgs diera un salto cuántico a un nuevo valor, lo que daría lugar a un cambio repentino de las propiedades de las partículas que reescribiría muchos de los procesos básicos de la física, la química y la biología. El universo continuaría, pero casi seguro que sin nosotros. Si esta disyunción ocurriera mucho antes de las escalas de tiempo necesarias para que se formen los cerebros de Boltzmann - como sugieren actualmente los datos del campo de Higgs - los cerebros ordinarios dominarían la población, y evitaríamos el pantano escéptico.[29]

Una resolución aún más enfática surgiría de un salto cuántico en el que el valor de la energía oscura cambiaría repentinamente. Actualmente, la expansión acelerada del cosmos está impulsada por una energía oscura positiva que impregna todas las regiones del espacio. Pero así como la energía oscura positiva produce una gravedad repulsiva que empuja hacia afuera, la energía oscura negativa produce una gravedad atractiva que empuja hacia adentro. En consecuencia, un evento de tunelización cuántica en el que la energía oscura saltara a un valor negativo marcaría una transición desde la hinchazón del universo hacia fuera hasta su colapso hacia dentro. Tal giro de 180 grados resultaría en que todo -materia, energía, espacio y tiempo- se comprimiera hasta alcanzar una densidad y temperatura extraordinarias, una especie de big bang inverso que los físicos llaman el "*big crunch*". [30] Por mucho que haya incertidumbre sobre lo que ocurrió en el tiempo cero, desencadenando el bang, hay incertidumbre sobre lo que ocurriría en el momento final, la propia crisis. Lo que es evidente, sin embargo, es que si la crisis ocurriera en mucho menos tiempo que 101068 años, las peculiares implicaciones de los cerebros de Boltzmann volverían a ser discutibles.

En un enfoque final, interesante más allá de las consideraciones de los cerebros de Boltzmann, el físico Paul Steinhardt y sus colaboradores Neil Turok y Anna Ijjas imaginan transformar tal potencial crisis del fin del universo en un rebote más optimista que produzca un universo. [31] Según esta teoría, las regiones del espacio como la nuestra pasan por fases de expansión seguidas de contracción, con los ciclos repitiéndose indefinidamente. El big bang se convierte en el gran rebote, un rebote del período de contracción anterior. La idea en sí misma no es totalmente nueva. Poco después de que Einstein completara la teoría general de la relatividad, una versión cíclica de la cosmología fue propuesta por Alexander

Friedmann y posteriormente desarrollada por Richard Tolman. [32] El objetivo de Tolman, en particular, era esquivar la pregunta de cómo comenzó el universo. Si los ciclos se extienden infinitamente lejos del pasado, no hay comienzo. El universo siempre existió. Tolman encontró, sin embargo, que la segunda ley de la termodinámica frustraba esta visión. La continua acumulación de entropía de un ciclo a otro implica que el universo que habitamos actualmente sólo podría estar precedido por un número finito de ciclos, lo que requiere un comienzo después de todo. En su nueva versión del enfoque cíclico, Steinhardt e Ijjas argumentan que pueden superar este problema. Han establecido que durante cada ciclo una determinada región del espacio se extiende mucho más de lo que se contrae, asegurando que la entropía que contiene se diluya completamente. Ciclo tras ciclo, la entropía total a través de todo el espacio aumenta, según la segunda ley de la termodinámica. Pero en cualquier región finita, como la que da origen a nuestro reino observable, la acumulación entrópica que frenó a Tolman ya no es una preocupación. La expansión diluye toda la materia y la radiación, mientras que la subsiguiente contracción aprovecha la fuerza de la gravedad para reponer la energía de alta calidad suficiente para iniciar el ciclo de nuevo.

La duración de cada ciclo está determinada por el valor de la energía oscura que, según las mediciones actuales, establece la duración en el orden de cientos de miles de millones de años. Como este es mucho menos que el tiempo típico que requieren los cerebros de Boltzmann para formarse, la cosmología cíclica proporciona otra solución potencial para preservar la racionalidad. Mientras que durante un ciclo dado habría tiempo suficiente para producir cerebros de la manera ordinaria, el ciclo concluiría mucho antes de que hubiera tiempo para producir cerebros a la manera de Boltzmann. Con una confianza razonable podríamos entonces declarar que nuestros recuerdos fueron establecidos por eventos que realmente ocurrieron.

Mirando hacia el futuro, el enfoque cíclico sugiere que nuestra escalada al Empire State Building se interrumpiría, terminando en algún lugar en las proximidades del undécimo o duodécimo piso, cuando la fase de contracción del espacio resultaría en un rebote que concluye nuestro ciclo e inicia el siguiente. La linealidad de la metáfora del rascacielos también necesitaría una actualización de la forma de espiral (me viene a la mente una versión en alza del Museo Guggenheim), en la que cada vuelta representaría un ciclo cosmológico. Además, dado que los ciclos podrían persistir indefinidamente tanto en el pasado como en el futuro, tendríamos que prever que la estructura se extendiera infinitamente en ambas direcciones. La realidad tal como la conocemos sería parte de una sola vuelta alrededor de la pista cosmológica.

En los últimos años, la cosmología cíclica ha surgido como un principal competidor de la teoría inflacionaria. Aunque ambas pueden explicar las observaciones cosmológicas, incluidas las importantísimas variaciones de temperatura en la radiación de fondo de microondas, la teoría inflacionaria sigue dominando la investigación cosmológica. En parte esto refleja la ardua batalla para interesar a los físicos en una alternativa a una teoría que en el curso de cuatro décadas ha impulsado a la cosmología a una ciencia madura y precisa. El hecho de que la nuestra sea llamada la edad de oro de la cosmología es en gran parte atribuible a la teoría inflacionaria. Por supuesto, la verdad en la ciencia no está determinada

por las encuestas o la popularidad. Está determinada por experimentos, observaciones y pruebas. Y las teorías inflacionarias y cíclicas hacen una predicción observacional significativamente diferente, que puede algún día figurar prominentemente en la adjudicación entre ellas: El estallido de la expansión inflacionaria en el Big Bang probablemente habría perturbado tan vigorosamente el tejido del espacio que las ondas gravitacionales producidas podrían ser todavía detectables. La expansión más suave del modelo cíclico resulta en ondas gravitacionales demasiado suaves para ser observadas. En un futuro no muy lejano, las observaciones podrían tener la capacidad de inclinar el equilibrio entre los dos enfoques cosmológicos.[33]

Entre los investigadores, la inflación sigue siendo la principal teoría cosmológica, por lo que nos hemos centrado en ella en capítulos anteriores. Aún así, sigue siendo muy emocionante imaginar futuras observaciones que profundicen nuestro conocimiento del cosmos y que hagan de nuestra era uno de los muchos, quizás infinitos, momentos de comprensión incompleta. Aunque esto afectaría a nuestro debate sobre las primeras etapas del universo, así como a su desarrollo más allá del piso 12 más o menos, las consideraciones fundamentales de la entropía y la evolución que nos han guiado a lo largo de la mayor parte de nuestro viaje persistirían de todos modos. Lo más impactante de todo, si se confirmara la teoría cíclica, aprenderíamos que el más omnipresente de todos los patrones -nacimiento, muerte y renacimiento- se recapitula en escalas cosmológicas. Es una plantilla tentadora. Pensadores tan antiguos como los hindúes, egipcios y babilonios imaginaron que en lugar de un principio, un medio y un fin, el universo, como los días y las estaciones, podría pasar por una secuencia de ciclos que encajan entre sí. En un futuro no muy lejano, los datos recogidos por los observatorios de ondas gravitacionales pueden revelar si este patrón es adoptado por el propio cosmos.[34]

El pensamiento y el multiverso

¿Un viaje a velocidad arbitraria a las profundidades del espacio llegaría a su fin? ¿Podría continuar para siempre? ¿O quizás daría un círculo sobre sí mismo en un viaje cósmico a Magallanes? Nadie lo sabe. Dentro de la teoría inflacionaria, las formulaciones matemáticas más estudiadas implican que el espacio es infinito, explicando en parte por qué los investigadores han prestado más atención a esta posibilidad. Para el futuro lejano del pensamiento, el espacio infinito proporciona una consecuencia particularmente extravagante, así que sigamos la perspectiva inflacionaria dominante y asumamos que el espacio es infinito.[35]

La gran mayoría del espacio infinito estaría más allá de nuestra capacidad de ver. La luz emitida desde un lugar distante es visible para nuestros telescopios sólo si ha habido tiempo suficiente para que haya atravesado el espacio entre nosotros. Usando el máximo tiempo de viaje posible -la duración hasta el big bang, 13.800 millones de años- podemos calcular que la máxima distancia que podemos ver en cualquier dirección es de unos 45.000 millones de años-luz (podrías haber pensado que el límite sería de 13.800 millones de años-luz, pero como el espacio se expande mientras la luz está en tránsito, el lapso es mayor). Si creciste en un planeta más distante de la Tierra, no hay forma de que nos hayamos comunicado o influido directamente unos a otros. Así que asumiendo que el espacio es infinito, puedes

imaginarlo como un mosaico de regiones ampliamente separadas de 90 mil millones de años luz, con cada región evolucionando independientemente de las otras. [36] A los físicos les gusta pensar que cada una de esas regiones es su propio universo independiente, siendo toda la colección de esas regiones un *multiverso.* Por consiguiente, una expansión espacial infinita da lugar a un multiverso que contiene infinitamente muchos universos.

Al estudiar estos universos, los físicos Jaume Garriga y Alex Vilenkin [37] establecieron una característica fundamental. Si usted viera una serie de películas que mostrara el desarrollo cosmológico en cada una de ellas, las películas no podrían ser todas diferentes. Debido a que cada una de las regiones tiene un tamaño finito, y cada una contiene una gran pero finita cantidad de energía, sólo hay finamente muchas historias distintas que posiblemente se puedan representar. Intuitivamente, se podría pensar de otra manera. Podrías esperar que habría infinitas variaciones porque, dada cualquier historia, siempre puedes modificarla empujando esta partícula de esa manera o aquella de esta otra. Pero aquí está la cosa: si tus empujes son demasiado pequeños, caerán por debajo del límite de sensibilidad de la incertidumbre cuántica, y por lo tanto no tendrán sentido; si tus empujes son demasiado grandes, las partículas no permanecerán dentro de la región o sus energías excederán el máximo disponible. Limitado tanto a pequeña como a gran escala, sólo hay finamente muchas variaciones, y por lo tanto sólo finamente muchas películas diferentes son posibles.

Ahora, con infinitas regiones y finamente muchas películas, simplemente no hay suficientes películas diferentes para todos. Tenemos la garantía de que las películas se repetirán; de hecho, tenemos la garantía de que se repetirán infinitamente muchas veces. También se nos garantiza que cada película será utilizada. Los nervios cuánticos que hacen que una historia sea diferente de otra son aleatorios y, por lo tanto, muestran todas las configuraciones posibles. Ninguna historia se deja atrás. La infinita colección de universos realiza así cada historia posible, y cada una de esas historias se realiza infinitamente a menudo.

Esto conlleva una conclusión peculiar: la realidad que tú y yo y todos los demás experimentamos está sucediendo ahí fuera en otras regiones, en otros universos, una y otra vez. Modifica esa realidad de cualquier manera que no esté estrictamente prohibida por las leyes de la física (no puedes violar la conservación de la energía o la carga eléctrica, por ejemplo) y también está ahí fuera, una y otra vez. Hace cosquillas a la mente para comprender los reinos donde las realidades alternativas se desarrollan: Lee Harvey Oswald falla, Claus von Stauffenberg tiene éxito, James Earl Ray no. Los aficionados al quantum reconocerán una similitud con la llamada interpretación de la física cuántica de Muchos Mundos, que prevé que todos los resultados posibles permitidos por las leyes cuánticas tienen lugar en su propio universo separado. Los físicos han debatido durante más de medio siglo si este enfoque de la mecánica cuántica es matemáticamente sensato y si, en caso afirmativo, los demás universos son reales o meras ficciones matemáticas útiles. La diferencia esencial en la teoría cosmológica que estamos contando ahora es que los otros mundos -las otras regiones- no son una cuestión de interpretación. Si el espacio es infinito, las otras regiones *están* ahí fuera.

De todo lo que hemos explorado en este y en los capítulos anteriores, es razonable concluir que aquí en nuestra región, en nuestro universo, nuestros días, y los de los seres pensantes en general, están contados. El número puede ser grande, pero en algún lugar a lo largo de la subida al Empire State Building, o quizás más allá, la vida y la mente probablemente llegarán a su fin. Con este telón de fondo, Garriga y Vilenkin ofrecen un curioso tipo de optimismo. Señalan que, debido a que cada historia se desarrolla a través de la infinita colección de universos, algunos disfrutarán necesariamente de raras pero fortuitas caídas de entropía que mantienen intactas determinadas estrellas y planetas, o producen nuevos entornos que contienen fuentes de energía de alta calidad, o cualquiera de una amplia gama de desarrollos improbables que permitirán que la vida y el pensamiento persistan mucho más tiempo del que se espera. De hecho, como argumentan Garriga y Vilenkin, si se selecciona *cualquier* duración finita, por larga que sea, habrá universos entre la colección infinita en los que los procesos improbables nadan contra la corriente entrópica para mantener la vida viva por lo menos durante esa duración. Y así, entre la infinidad de universos, algunos albergarán vida y mente arbitrariamente en el futuro.

Es difícil saber cómo los habitantes de tales regiones explicarían su buena fortuna de haber logrado sobrevivir. O incluso si fueran conscientes de su buena fortuna. Tal vez habrían alcanzado la misma comprensión de la física que nosotros y reconocerían que las fluctuaciones aleatorias pueden dar lugar a resultados raros y fortuitos. Pero ese mismo conocimiento dejaría claro al mismo tiempo que lo que están experimentando, aunque posible, es extraordinariamente improbable. A partir de esta comprensión, podrían llegar a la conclusión de que necesitan revisar su comprensión de la física. Piénsalo. Aunque las leyes probabilísticas de la física cuántica permiten la posibilidad de que pueda atravesar una pared sólida, si lo hiciera, y lo hiciera repetidamente, querríamos renovar nuestra comprensión de la física cuántica. No porque yo hubiera contravenido las leyes cuánticas. No lo habría hecho. Es simplemente que si ocurren eventos supuestamente improbables, y ocurren a menudo, estamos dispuestos a buscar mejores explicaciones según las cuales los eventos no son tan improbables después de todo. Por supuesto, también es posible que los habitantes de tales reinos afortunados no se centren en las explicaciones en absoluto y simplemente sigan la corriente y vivan felizmente indefinidamente.

Como no hay casi nada de que habitemos una región así o que estemos lo suficientemente cerca de ella como para escapar de ella, quizás cuando se vislumbre nuestro propio fin, reuniremos lo que hemos aprendido, descubierto y creado y lo empaquetaremos en una cápsula que lanzaremos con la esperanza de que algún día pueda llegar a uno de los reinos más afortunados. Si no somos parte de un linaje que se extiende a la eternidad, tal vez podamos transmitir la esencia de nuestros logros a aquellos que sí lo son. Tal vez, aunque sea indirectamente, podamos dejar un rastro en la eternidad. Garriga y Vilenkin estudian una versión de este escenario, y junto con las ideas del filósofo David Deutsch, concluyen que el plan es inútil. A través de la infinidad de universos y la inmensidad de las escalas de tiempo, las fluctuaciones cuánticas aleatorias producirán muchas más cápsulas falsas de las que nuestros descendientes serán capaces de producir las reales, asegurando que cualquier huella fiable de quiénes somos y lo que hemos logrado se perderá en el ruido cuántico.

La vida y el pensamiento aquí en nuestro universo, en lo que por mucho tiempo hemos considerado *el* universo, probablemente se acercará a su fin. Tal vez haya consuelo en saber que en algún lugar de las vastas extensiones del espacio infinito, más allá de los límites de nuestro reino, la vida y el pensamiento pueden persistir, posiblemente indefinidamente. Aún así, aunque podamos contemplar la eternidad, y aunque podamos alcanzar la eternidad, aparentemente no podemos tocar la eternidad.

11

LA NOBLEZA DE SER

Mente, materia y significado

El guía del Parque Nacional de Pilanesberg, con un rifle colgado a la espalda, comprobaba que los que le acompañaban a pie respondieran adecuadamente si un elefante, un hipopótamo o un león se acercaban demasiado. "Tú... quédate... quieto", dijo, enfatizando cada palabra mientras recorría lentamente el grupo. "¿Huir de un león? Pasas el resto de tu vida tratando de ganar la carrera". Riendo suavemente, todos murmuramos "sí" y "por supuesto" y "absolutamente". En ese momento miré hacia abajo a la manga de mi camisa de ajuste holgado. Identificar con precisión lo que se aferraba a mi puño era poco preocupante. Para mí era una tarántula. Y se estaba abriendo camino hacia arriba. Me asusté. Mi brazo voló de un lado a otro, tirando los vasos de la mesa del desayuno. Salté de mi silla, y los platos que habían sobrevivido a mi sacudida inicial ahora también caían. En el tumulto, la tarántula, o cualquier cosa espeluznante que fuera, se desprendió. Para cuando recuperé la compostura, la pequeña criatura del tamaño de una moneda estaba en el suelo, arrastrándose lentamente. "Ah", dijo el guía, sonriendo, cuando todo se había calmado, "el universo ha hablado por nuestro físico amigo". Viajas en el Jeep". Y lo hice.

El universo no había hablado por mí. El ataque fue al azar y su sincronización fue una casualidad. Si fuera una parte desinteresada, ofrecería mi réplica estándar, señalada anteriormente, de que en ausencia de tal evento no sería una sorpresa que tal coincidencia *no hubiera* ocurrido. Pero la verdad es que, por un breve momento, el embarazoso episodio se sintió significativo. Ya me sentía inquieto por un safari a pie, me preguntaba si debía echarme atrás, y entonces me entregaron un recordatorio hecho a medida de que este riesgo particular no es en el mejor interés de alguien que, cuando se pierde en el pensamiento, puede ser sorprendido casi hasta la muerte por un saludo imprevisto. Racionalmente, sé que este tipo de charla es una tontería. El universo no controla lo que hago o los peligros que afronto. Aún así, mientras los instintos atávicos inflamados por el ataque de la tarántula se calmaban gradualmente, el pensamiento racional estaba a un paso o dos de recuperar el control total.

La sensibilidad al patrón es, en parte, la forma en que hemos prevalecido. Buscamos conexiones. Tomamos nota de las coincidencias. Marcamos regularidades. Asignamos significado. Pero sólo algunas de estas asignaciones resultan de análisis considerados que delinean características demostrables de la realidad. Muchos surgen de una preferencia emocional por imponer una apariencia de orden en el caos de la experiencia.

Orden y significado

A menudo hablo como si nuestras ecuaciones matemáticas estuvieran ahí fuera en el mundo, controlando implacablemente todos los procesos físicos, los quarks del cosmos. Ese puede ser el caso. Tal vez algún día estableceremos que las matemáticas están fundamentalmente cosidas en el tapiz de la realidad. Cuando trabajas con las ecuaciones día tras día, seguramente se siente así. Sin embargo, tengo más confianza en afirmar que la naturaleza es legal, que el universo está hecho de ingredientes cuyo comportamiento sigue una progresión legal, la base misma del viaje que hemos hecho en este libro. Las ecuaciones en el núcleo de la física moderna representan nuestra declaración más precisa de las leyes. A través de diligentes experimentos y observaciones hemos establecido que estas ecuaciones proporcionan una espectacularmente precisa cuenta del mundo. Pero no hay garantía de que se expresen en el léxico intrínseco de la naturaleza. Aunque lo considero improbable, permito la posibilidad de que en el futuro, cuando mostremos con orgullo a los visitantes alienígenas nuestras ecuaciones, ellos sonreirán educadamente, nos dirán que ellos también empezaron con las matemáticas pero luego descubrieron el *verdadero lenguaje* de la realidad.

Históricamente, la intuición física de nuestros antepasados fue informada por los patrones evidentes en los encuentros familiares, desde la caída de rocas hasta el chasquido de ramas y las corrientes de agua; hay un manifiesto valor de supervivencia en tener un sentido innato de la mecánica diaria. Con el tiempo, empleamos nuestras capacidades cognitivas para ir más allá de tales intuiciones de supervivencia, iluminando y codificando patrones en reinos que van desde el micromundo de las partículas individuales hasta el macromundo de las galaxias agrupadas, muchas de las cuales tienen poco o ningún valor de adaptación. Al dar forma a nuestra intuición y desarrollar nuestras habilidades cognitivas, la evolución inició nuestra educación en física, pero nuestra comprensión más amplia ha surgido de la fuerza de la curiosidad humana expresada a través del lenguaje de las matemáticas. Las ecuaciones resultantes articuladas en este lenguaje son de profunda utilidad para explorar la estructura profunda de la realidad, pero no obstante pueden ser construcciones de la mente humana.

Me aferro a una versión de esta perspectiva cuando nos centramos en las cualidades que guían nuestra evaluación de la experiencia humana. El bien y el mal, el bien y el mal, el destino y el propósito, el valor y el significado son todos conceptos profundamente útiles, pero no estoy entre los que creen que los juicios morales y las asignaciones de significado trascienden la mente humana. Nosotros inventamos estas cualidades. No de una tela entera. Nuestras mentes seleccionadas por los darwinianos están predispuestas a ser atraídas o rechazadas por o asustadas por varias ideas y comportamientos.

En todo el mundo, el cuidado de los jóvenes es muy importante, mientras que el incesto es aborrecible. La justicia en el día a día es ampliamente valorada, así como la lealtad a la familia y a los compatriotas. A medida que nuestros antepasados se reunían en grupos, la interacción de estas y otras numerosas predisposiciones con los encuentros sobre el terreno creaban bucles de retroalimentación: El comportamiento de los individuos influyó en la efectividad de la vida en grupo, llevando a la articulación gradual de códigos de conducta comunales. A su vez, esos códigos de conducta contribuyeron con diferentes grados de valor de supervivencia a los que los siguieron. [1] Así como la selección natural dio forma a nuestra intuición para la física básica, también tuvo que ver con la formación de nuestro sentido innato de moralidad y valor.

Incluso entre quienes están de acuerdo con la creencia de que los códigos morales no se imponen desde lo alto o flotan en un reino abstracto de la verdad, existe un saludable debate sobre el papel de la cognición humana en la determinación de cómo se desarrollaron estas primeras sensibilidades. Algunos sugieren que, de forma similar a la pauta de desarrollo de la física, la evolución imprimió un sentido moral rudimentario, pero nuestros poderes cognitivos nos han permitido saltar más allá de esa base innata para formar actitudes y creencias independientes. [2] Otros sugieren que somos adeptos a usar nuestra destreza cognitiva para explicar nuestros compromisos morales, pero estos relatos son sólo historias, racionalizaciones de juicios anclados en nuestro pasado evolutivo. [3]

Un punto digno de resaltar es que ninguna de estas posiciones se basa en una concepción tradicional de libre albedrío. Al describir el comportamiento humano, invocamos una amalgama de factores, desde el instinto y la memoria hasta la percepción y la expectativa social. Sin embargo, como se ha argumentado anteriormente, este tipo de contabilidad de alto nivel -que constituye el núcleo de la forma en que los humanos damos sentido al mundo- emerge de una compleja cadena de procesos que descansan en última instancia en la dinámica de los componentes fundamentales de la naturaleza. Todos somos colecciones de partículas, beneficiarias de innumerables batallas evolutivas que han desbloqueado nuestros comportamientos y nos han dado la capacidad de retrasar la decadencia entrópica. Pero tales triunfos no nos otorgan poderes de libre voluntad sobre la progresión física; el despliegue no espera nuestros deseos, juicios y evaluaciones morales. O, para ser más precisos, nuestros deseos, juicios y evaluaciones morales son simplemente parte de la progresión física del mundo, como lo dictan las leyes desapasionadas de la naturaleza.

Nuestra descripción de esa progresión invoca reglas matemáticas impersonales que establecen en símbolos cómo se desarrollará el universo de un momento a otro. Y durante gran parte del pasado, antes de la aparición de colecciones de partículas capaces de reflejar la realidad, esta historia era la historia completa. Familiarizados como estamos ahora con los

detalles esenciales, podemos contar nuestra versión más refinada, aunque provisional, de esa historia, rápida, breve y, para facilitar el lenguaje, con un matiz antropomórfico.

Hace unos 13.800 millones de años, dentro del espacio ferozmente hinchado, la energía contenida en una diminuta pero ordenada nube de campo inflado se desintegró, cerrando la gravedad repulsiva, llenando el espacio con un baño de partículas, y sembrando la síntesis de los núcleos atómicos más simples. Donde la incertidumbre cuántica hizo que la densidad del baño fuera ligeramente mayor, la atracción gravitatoria fue ligeramente más fuerte, atrayendo a las partículas para que se juntaran en grupos cada vez mayores, formando estrellas, planetas, lunas y otros cuerpos celestes. La fusión dentro de las estrellas, así como las raras pero poderosas colisiones estelares, fusionaron núcleos simples en especies atómicas más complejas, las cuales, al llover sobre al menos un planeta en formación, fueron persuadidas por el Darwinismo molecular para que se ensamblaran en arreglos capaces de auto-replicarse. Variaciones aleatorias de los arreglos que se produjeron para fomentar la fecundidad molecular se extendieron ampliamente.

Y entre ellas había vías moleculares para extraer, almacenar y dispersar la información y la energía, los procesos rudimentarios de la vida que, a lo largo de la larga evolución darwiniana, se fueron refinando cada vez más. Con el tiempo, surgieron seres vivos complejos y autodirigidos.

Partículas y campos. Leyes físicas y condiciones iniciales. Hasta la profundidad de la realidad que hemos sondeado hasta ahora, no hay evidencia de nada más. Las partículas y los campos son los ingredientes elementales. Las leyes físicas impulsadas por las condiciones iniciales dictan la progresión. Debido a que la realidad es mecánica cuántica, los pronunciamientos de las leyes son probabilísticos, pero aún así las probabilidades están rígidamente determinadas por las matemáticas. Las partículas y los campos hacen lo que hacen sin preocuparse por el significado o el valor o la importancia. Incluso cuando su indiferente progresión matemática da vida, las leyes físicas mantienen un control completo. La vida no tiene capacidad para interceder o anular o influir en las leyes.

Lo que la vida puede hacer es facilitar que grupos de partículas actúen en concierto y manifiesten comportamientos colectivos que, comparados con el mundo inanimado, son novedosos. Las partículas que constituyen las caléndulas y las canicas se adhieren plenamente a las leyes de la naturaleza, pero las caléndulas crecen y siguen al sol mientras que las canicas no. A través de la fuerza de la selección, la evolución toma parte en la formación del repertorio de comportamiento de la vida, favoreciendo las actividades que promueven la supervivencia y la reproducción. Entre éstas, en última instancia, está el pensamiento. La capacidad de formar recuerdos, analizar situaciones y extrapolar a partir de la experiencia proporciona una potente artillería en la carrera armamentística para la supervivencia. Impulsando una serie de victorias a través de decenas de miles de generaciones, el pensamiento se refina gradualmente, resultando en especies pensantes que adquieren varios grados de autoconciencia. Las voluntades de estos seres no son libres en el sentido tradicional de salirse del despliegue dictado por la ley física, pero su estructura altamente organizada permite una gran cantidad de respuestas -desde las emociones internas hasta los comportamientos externos- que, al menos hasta ahora, no están disponibles para las colecciones de partículas que carecen de vida o mente.

Si añadimos el lenguaje, una de esas especies conscientes de sí mismas se eleva por encima de las necesidades del momento para verse a sí misma como parte de un despliegue del pasado al futuro. Con eso, ganar la batalla ya no es la única preocupación. Ya no estamos satisfechos con la mera supervivencia. Queremos saber por qué la supervivencia es importante. Buscamos el contexto. Buscamos relevancia. Asignamos valor. Juzgamos el comportamiento. Buscamos el significado.

Y así desarrollamos explicaciones de cómo el universo llegó a ser y cómo podría terminar. Contamos y volvemos a contar historias de mentes que se abren camino a través de mundos, reales y fantasiosos. Imaginamos reinos poblados por antepasados fallecidos o seres semi-poderosos o todopoderosos que reducen la muerte a un peldaño de una existencia en curso. Pintamos, tallamos, grabamos, cantamos y bailamos para tocar estos otros reinos, o para rendirles homenaje, o simplemente para imprimir el futuro con algo que atestigue nuestro breve tiempo en el sol. Tal vez estas pasiones se afianzan y se convierten en parte de lo que significa ser humano, porque mejoran la supervivencia. Las historias preparan la mente para responder a lo inesperado; el arte desarrolla la imaginación y la innovación; la música agudiza la sensibilidad a los patrones; la religión une a los seguidores en fuertes coaliciones. O quizás la explicación es menos elevada: algunas o todas las actividades pueden surgir y persistir porque se apalancan o se unen a otros

comportamientos y respuestas que han jugado un papel más directo en el avance de la supervivencia. Pero incluso con su origen evolutivo aún en debate, estos aspectos del comportamiento humano manifiestan una necesidad generalizada de ir más allá de la mera búsqueda de la supervivencia transitoria. Revelan un deseo generalizado de ser parte de algo más grande, algo duradero. El valor y el significado, decididamente ausentes de los cimientos de la realidad, se vuelven intrínsecos a un impulso inquieto que nos eleva por encima de la naturaleza indiferente.

Mortalidad y significado

Mientras que Gottfried Leibniz se preguntaba por qué hay algo en lugar de nada, el dilema profundamente personal es que las cosas autoconscientes, como nosotros, posteriormente se disuelven en la nada. Adquirir una perspectiva temporal es darse cuenta de que la actividad vibrante que anima la propia mente cesará algún día.

Con el telón de fondo de esa conciencia, los capítulos anteriores han explorado toda la extensión del tiempo desde nuestra mejor comprensión de su comienzo hasta lo más cercano que nuestras teorías matemáticas pueden llevarnos a su final. ¿Continuará desarrollándose nuestra comprensión? Por supuesto. ¿Se mejorarán o se sustituirán los detalles, algunos menores y otros significativos? Sin duda alguna. Pero el ritmo de nacimiento y muerte, aparición y desintegración, creación y destrucción que hemos visto en la línea de tiempo persistirá. Los dos pasos entrópicos y las fuerzas evolutivas de selección enriquecen el camino del orden al desorden con una estructura prodigiosa, pero ya sean estrellas o agujeros negros, planetas o personas, moléculas o átomos, las cosas finalmente se desmoronan. La longevidad varía mucho. Sin embargo, el hecho de que todos moriremos, y el hecho de que la especie humana morirá, y el hecho de que la vida y la mente, al menos en este universo, son prácticamente seguros de morir son resultados normales y corrientes de la ley física a largo plazo. La única novedad es que nos damos cuenta.

Una expectativa frecuente, aunque tensa, ligeramente entretenida por muchos y perseguida intensamente por algunos, es que estaríamos mucho mejor si la muerte se apartara por completo de los procedimientos humanos. Desde el mito antiguo hasta la ficción moderna, los pensadores han ponderado la posibilidad. Tal vez sea revelador que en estas excursiones las cosas no siempre resulten tan bien. Los inmortales en la tierra de Luggnagg de Jonathan Swift continúan envejeciendo y son declarados legalmente muertos a los ochenta años mientras se vuelven irrelevantes. Habiendo soportado durante más de trescientos años, la heroína de Karel Čapek, Elina Makropulos, permite que la fórmula de un elixir para prolongar la vida se incendie en lugar de continuar en un estado de profundo aburrimiento. Vivir en un mundo interminable sin muerte, escribe el protagonista de "El Inmortal" de Jorge Luis Borges, "nadie es nadie, un solo hombre inmortal es todo hombre... Yo soy dios, yo soy héroe, yo soy filósofo, yo soy demonio y yo soy mundo, lo cual es una forma tediosa de decir que yo no existo".[4]

Los filósofos también han pisado estas aguas, ofreciendo evaluaciones sistemáticas de la vida en un mundo sin muerte. Algunos, como Bernard Williams, que se inspiró en la

adaptación operística de Karl Janacek de la obra de Čapek, llegan a conclusiones igualmente sombrías. [5] Williams argumenta que con el tiempo interminable cada uno de nosotros saciaría cada objetivo que nos impulsa a seguir adelante, dejándonos desanimados ante una eternidad de monotonía insoportable. Otros, como Aaron Smuts, inspirado en parte por la historia de Borges, sostienen que la inmortalidad agotaría las decisiones que dan forma a la vida humana -cómo pasar el tiempo y con quién- de las consecuencias esenciales para su significado. ¿Hacer la elección equivocada? No hay problema. Tienes una eternidad para hacerla bien. La satisfacción del logro también caería víctima de la inmortalidad. Aquellos con habilidades limitadas alcanzarían su potencial y luego experimentarían una frustración eterna; aquellos con habilidades capaces de profundizar sin límite se les garantizaría mejorar continuamente, desinflando la sensación de logro que proviene de superar las expectativas.[6]

A pesar de estas preocupaciones, sospecho que somos lo suficientemente ingeniosos - y dotados de un tiempo interminable nos convertiremos en inmortales bien ajustados. Nuestras necesidades y capacidades probablemente se transformarían más allá del reconocimiento, haciendo que las evaluaciones basadas en lo que nos mantiene comprometidos y motivados en el aquí y ahora tengan poca o ninguna relevancia. Si la eterna alegría de vivir requiriera un sabor diferente de alegría, la encontraríamos, la inventaríamos o la desarrollaríamos. Esto no es más que una corazonada, por supuesto, pero concluir que necesariamente nos aburriríamos sugiere una visión excesivamente parroquial de la mente inmortal.

Mientras que la ciencia continuará extendiendo la duración de la vida, nuestro viaje al futuro lejano sugiere que la inmortalidad permanecerá para siempre fuera de alcance. A pesar de eso, pensar en la vida que nunca termina aclara la relevancia de la vida que sí lo hace. El destino imaginado de valor y significado en un mundo inmortal deja claro que en un mortal entender muchas de nuestras decisiones, elecciones, experiencias y reacciones requiere verlas en el contexto de oportunidad limitada y duración finita. No es que nos pongamos de pie cada mañana llorando "¡Carpe diem!", sino que el conocimiento profundo de que hay tantas mañanas en las que nos levantaremos infunde un cálculo intuitivo de valor, uno que sería muy diferente en un mundo con repeticiones ilimitadas. Las explicaciones que damos sobre los temas que estudiamos, los oficios que aprendemos, el trabajo que realizamos, los riesgos que asumimos, los socios a los que nos unimos, las familias que construimos, los objetivos que nos fijamos, las preocupaciones que albergamos, todo refleja el reconocimiento de que nuestras oportunidades son escasas porque nuestro tiempo es limitado.

Cada uno de nosotros responde a ese reconocimiento a su manera, pero hay cualidades comunes que atraviesan el sentido del valor humano. Entre ellas se encuentra una necesidad sorprendentemente fuerte, aunque a menudo no expresada, de un futuro poblado por descendientes que continuarán después de que nos hayamos ido.

Descendientes

Hace muchos años me pidieron que participara en una charla posterior a la actuación con el público de un espectáculo off-Broadway en el que una serie de personajes se dan cuenta de que la Tierra será destruida en breve por un asteroide. Mi compañero de conversación era mi hermano; los productores anticiparon que el comentario sobre el fin del mundo de los hermanos cuyas vidas habían seguido caminos divergentes pero relevantes -uno inmerso en la ciencia y el otro en la religión- sería un placer para la multitud. Francamente, no pensé mucho en los temas antes del evento, y en esos días era mucho más susceptible a la energía de la audiencia. Cuanto más se desviaba mi hermano hacia los reinos etéreos, más brusco me volvía. "La Tierra es un planeta peatonal que orbita alrededor de una estrella ordinaria en los suburbios de una galaxia ordinaria. Si nos saca un asteroide, el universo no parpadeará. En el gran esquema de las cosas, simplemente no importará". La oscuridad fue bienvenida por algunos, supongo que por aquellos que se identificaron como escépticos sin sentido enfrentándose valientemente a las realidades de la existencia. Pero para otros, lamentablemente, mis comentarios resultaron petulantes. Bueno, al menos un miembro del público se sintió así: una anciana que me regañó por haberle dado la espalda a lo que describió como una necesidad esencial que todos tenemos para que la especie continúe. "¿Qué noticia te afectaría más", preguntó, "que te digan que tienes un año de vida o que en un año la tierra será destruida?"

En ese momento dije algo fácil al respecto, dependiendo de si cualquiera de los dos resultados implicaría dolor físico, pero más tarde, mientras reflexionaba sobre la pregunta, la encontré inesperadamente esclarecedora. Un pronóstico terminal afecta a las personas de diferentes maneras: centrando la atención, proporcionando perspectiva, avivando el arrepentimiento, alimentando el pánico, aportando compostura, inspirando una epifanía. Anticipé que mi propia reacción se encontraría en algún lugar entre estos. Pero la perspectiva de que la Tierra y toda la humanidad serían aniquiladas desencadenó un tipo de reacción diferente. Las noticias harían que todo pareciera bastante inútil. Mientras que mi propio final inminente aumentaría la intensidad, dotando de importancia a momentos que de otra manera podrían haber retrocedido en la rutina diaria, contemplar el fin de toda la especie parecía hacer lo contrario, produciendo una sensación de inutilidad. ¿Seguiría levantándome por la mañana y querría seguir investigando en física? Tal vez por la comodidad de hacer algo familiar, pero sin nadie que construya sobre los descubrimientos de hoy, la atracción del conocimiento avanzado se debilitaría. ¿Terminaría el libro que estaba escribiendo? Tal vez por la satisfacción de atar cabos sueltos, pero sin nadie que lea el trabajo terminado la motivación se debilitaría. ¿Seguiría enviando a mis hijos a la escuela? Tal vez por la calma que ofrece la rutina, pero sin futuro, ¿para qué se estarían preparando?

Me sorprendió el contraste con la forma en que reaccionaría al saber la fecha de mi propia muerte. Mientras que una realización parecía intensificar la conciencia del valor de la vida, la otra parecía agotarla. En los años siguientes, esta comprensión ha ayudado a moldear mi pensamiento sobre el futuro. Hacía mucho tiempo que había tenido mi epifanía juvenil sobre la capacidad de las matemáticas y la física para trascender el tiempo; ya estaba convencido de la importancia existencial del futuro. Pero mi imagen de ese futuro

era abstracta. Era una tierra de ecuaciones, teoremas y leyes, no un lugar poblado de rocas, árboles y gente. No soy platonista pero, aún así, implícitamente imaginé que las matemáticas y la física trascenderían no sólo el tiempo, sino también las habituales trampas de la realidad material. El escenario del día del juicio final refinó mi pensamiento, haciendo evidente que nuestras ecuaciones, teoremas y leyes, incluso si se basan en verdades fundamentales, no tienen ningún valor intrínseco. Son, después de todo, una colección de líneas y garabatos dibujados en pizarras e impresos en diarios y libros de texto. Su valor deriva de aquellos que las entienden y las aprecian. Su valor se deriva de las mentes que habitan.

Este refinamiento en el pensamiento fue mucho más allá del papel de las ecuaciones. Al llevarme a imaginar un futuro sin nadie que reciba todo lo que valoramos, sin nadie que añada su propia huella icónica y la transmita a las generaciones futuras, el escenario del día del juicio final reveló lo vacío que se sentiría ese futuro. Mientras que la inmortalidad del individuo puede minar la importancia, la inmortalidad de la especie parece necesaria para asegurarla.

No puedo estar seguro de cuán extendida sería esta reacción a la noticia de un final inminente, pero sospecho que sería común. El filósofo Samuel Scheffler inició recientemente una investigación académica sobre el tema, explorando una variante de la pregunta que se me planteó hace décadas. ¿Cómo respondería usted, pregunta Scheffler, si se enterara de que treinta días después de su propia muerte todos los que quedan serían eliminados? Es una versión más reveladora del escenario, ya que excita la propia mortalidad prematura y por lo tanto pone más de relieve el papel de los descendientes en el anclaje del valor. La conclusión cuidadosamente razonada de Scheffler resuena con mis propias reflexiones informales:

> Nuestras preocupaciones y compromisos, nuestros valores y juicios de importancia, nuestro sentido de lo que importa y de lo que vale la pena hacer, todas estas cosas se forman y sostienen en un contexto en el que se da por sentado que la vida humana es en sí misma una empresa próspera y continua... Necesitamos que la humanidad tenga un futuro para que la idea misma de que las cosas *importan conserve* un lugar seguro en nuestro repertorio conceptual.[7]

Otros filósofos también han intervenido, aportando opiniones que delinean una gama más amplia de perspectivas. Susan Wolf sugiere que el reconocimiento de nuestro destino compartido podría elevar el cuidado por los demás a nuevas alturas, pero aún así, está de acuerdo en que nuestra visión de un futuro poblado por humanos es esencial para el valor que atribuimos a nuestras empresas. [8] Harry Frankfurt ofrece un punto de vista diferente, sugiriendo que muchas cosas que valoramos no se verían afectadas por el escenario del día del juicio final, sobre todo las actividades artísticas y la investigación científica. La intrínseca gratificación de estas actividades, cree, sería suficiente para que muchos se mantuvieran en ello. Ya he dado mi opinión contraria sobre la investigación científica, que sirve para enfatizar un punto relacionado, obvio pero revelador: la gente responderá a las noticias de diferentes maneras. [9] Lo mejor que podemos hacer es prever las tendencias

dominantes. Para mí, y para muchos otros también, involucrarse en actividades creativas y emprendimientos académicos es sentirse parte de un largo, rico y continuo diálogo humano. Incluso si un determinado trabajo de física que escribo no incendia el mundo, el trabajo sin embargo me hace sentir parte de la conversación. Sin embargo, si sé que soy el último en hablar, y si sé que en el futuro no habrá nadie que reflexione sobre lo que digo, me quedo pensando por qué debería molestarme.

En el escenario de Scheffler, así como en la pregunta que se me hizo años antes, los días del juicio final son hipotéticos pero los plazos para la destrucción del mundo son fáciles de comprender. En este libro, los días del juicio final que hemos explorado son genuinos pero sus escalas de tiempo los hacen extraordinariamente remotos. ¿Este cambio de escala, un cambio colosal, afecta las conclusiones? Es un tema que tanto Scheffler como Wolf consideran, entretenidamente enmarcado por la maravillosa escena en *Annie Hall* en la que Alvy Singer, de nueve años, ha concluido que no tiene sentido hacer los deberes ya que en unos pocos miles de millones de años el universo en expansión se romperá y destruirá todo. El psiquiatra de Alvy, y mucho menos su madre, considera ridícula la preocupación de Alvy. El público se ríe porque considera que la preocupación de Alvy es una farsa. Scheffler comparte estas intuiciones, sin embargo, señala que no tiene una justificación fundamental de por qué pensamos que es razonable tener una crisis existencial ante una destrucción inminente, pero es tonto hacerlo cuando dicha destrucción está lejos en el futuro. Lo atribuye a la dificultad que tenemos para comprender las escalas de tiempo que están mucho más allá del rango de la experiencia humana. Wolf está de acuerdo, señalando que si la muerte inmediata de la humanidad haría que la vida no tuviera sentido, entonces lo mismo debería ser cierto incluso si el final está lejos. De hecho, como señala, en las escalas de tiempo cósmicas el retraso de unos pocos miles de millones de años no es largo en absoluto.

Estoy de acuerdo. Enérgicamente.

Como hemos visto repetidamente, la noción de que una duración sea larga o corta no tiene un significado absoluto. Larga o corta es una cuestión de perspectiva. El tiempo representado por la plataforma de observación del Empire State Building, piso 86, es enorme para los estándares cotidianos, pero comparar esa duración con el tiempo representado por el piso 100 es como comparar un abrir y cerrar de ojos con diez mil siglos. Nuestra perspectiva humana familiar nos lleva a juicios que, si bien son relevantes, también son parroquiales. Por ello, considero que el escenario de la desaparición inminente no es más que una herramienta que emplea la urgencia artificial para catalizar una respuesta auténtica. La intuición que recogemos sigue siendo relevante para un fin que espera a nuestros descendientes en un futuro lejano; ese futuro, visto desde un contexto más amplio, *está a* un momento de distancia.

Si bien es realmente un desafío internalizar escalas de tiempo que están significativamente más allá de cualquier cosa que experimentemos, el viaje que hemos hecho en este libro ha poblado la línea de tiempo cósmica con puntos de referencia que sirven para hacer lo abstracto concreto. No puedo decir que tenga un sentido innato de las escalas de tiempo marcadas a lo largo de la metáfora del Empire State Building de la misma

manera que siento las escalas de tiempo de la vida diaria o las de mi generación o incluso de unas pocas generaciones, pero la secuencia de eventos transformadores que hemos explorado proporciona asideros para captar el futuro. No es necesario cantar, y la posición de loto es opcional, pero si encuentras un lugar tranquilo y dejas que tu mente flote lenta y libremente a lo largo de la línea de tiempo cósmica, moviéndose a través y luego pasando nuestra época, pasando la era de las galaxias distantes en retroceso, pasando la era de los sistemas solares majestuosos, pasando la era de las elegantes galaxias giratorias, pasando la era de las estrellas quemadas y los planetas errantes, pasando la era de los agujeros negros brillantes y desintegrados, y hacia adelante a una fría, oscura, casi vacía pero potencialmente ilimitada extensión - en la que la evidencia de que una vez existimos equivale a una partícula aislada localizada aquí en vez de allá u otra partícula aislada moviéndose hacia aquí en vez de hacia allá - y si eres como yo y dejas que esa realidad se asiente completamente, el hecho de que hayamos viajado fantásticamente lejos en el futuro difícilmente disminuye la estremecedora pero asombrosa sensación que brota en el interior. De hecho, de una manera esencial, el enorme barrido del tiempo sólo añade peso a la casi insoportable ligereza del ser; comparado con la escala de tiempo que hemos alcanzado, la época de la vida y la mente es infinitesimal. Según las escalas actuales, su duración total, desde los primeros microbios hasta el pensamiento final, sería menor que la duración requerida para que la luz atraviese un núcleo atómico. La duración total de la actividad humana -ya sea que nos aniquilemos en los próximos siglos, que seamos arrasados por un desastre natural en los próximos milenios, o que de alguna manera encontremos una forma de continuar hasta la muerte del sol, el fin de la Vía Láctea, o incluso la desaparición de la materia compleja- sería aún más fugaz.

Somos efímeros. Somos evanescentes.

Sin embargo, nuestro momento es raro y extraordinario, un reconocimiento que nos permite hacer de la impermanencia de la vida y la escasez de conciencia autorreflexiva la base del valor y el fundamento de la gratitud. Aunque es posible que deseemos un legado perdurable, la claridad que obtenemos al explorar la línea de tiempo cósmica revela que esto está fuera de nuestro alcance. Pero esa misma claridad subraya lo absolutamente maravilloso que es que una pequeña colección de partículas del universo pueda elevarse, examinarse a sí misma y a la realidad en la que habita, determinar cuán transitoria es, y con un revoloteo de actividad crear belleza, establecer conexión e iluminar el misterio.

Significado

La mayoría de nosotros lidiamos en silencio con la necesidad de elevarnos más allá de lo cotidiano. La mayoría permitimos que la civilización nos proteja de la realización de que somos parte de un mundo que, cuando nos hayamos ido, seguirá zumbando, apenas perdiendo el ritmo. Centramos nuestra energía en lo que podemos controlar. Construimos una comunidad. Participamos. Nos preocupamos. Nos reímos. Apreciamos. Confortamos. Nos afligimos. Amamos. Celebramos. Consagramos. Nos arrepentimos. Nos emocionamos por los logros, a veces nuestros, a veces de aquellos que respetamos o idolatramos.

A través de todo esto, nos acostumbramos a mirar al mundo para encontrar algo que nos excite o nos tranquilice, que nos llame la atención o nos lleve a un lugar nuevo. Sin embargo, el viaje científico que hemos hecho sugiere firmemente que el universo no existe para proporcionar un escenario para que la vida y la mente florezcan. La vida y la mente son simplemente un par de cosas que suceden. Hasta que no lo hacen. Solía imaginar que estudiando el universo, separándolo figurativa y literalmente, responderíamos suficientes preguntas de cómo para vislumbrar las respuestas a los porqués. Pero cuanto más aprendemos, más parece que esa postura se enfrenta en la dirección equivocada. Buscar que el universo nos abrace, sus ocupantes transitorios conscientes, es comprensible, pero eso no es lo que hace el universo.

Aún así, ver nuestro momento en el contexto es darse cuenta de que nuestra existencia es asombrosa. Vuelva a ejecutar el big bang pero cambie ligeramente la posición de esta partícula o el valor de ese campo, y para prácticamente cualquier jugueteo el nuevo despliegue cósmico no incluirá ni a usted ni a mí, ni a la especie humana, ni al planeta Tierra, ni a ninguna otra cosa que valoremos profundamente. Si una superinteligencia mirara al nuevo universo como un todo, de la misma manera que miramos una colección de centavos lanzados como un todo o el aire que respiramos ahora como un todo, concluiría que el nuevo universo se ve más o menos igual al original. Para nosotros, sería muy diferente. No habría un "nosotros" que notar. Al apartar nuestra atención de los detalles finos, la entropía ha proporcionado un principio organizador esencial para comprender las tendencias a gran escala de cómo se transforman las cosas. Pero mientras que generalmente no nos importa si este centavo es cara o cruz, o si una molécula de oxígeno en particular está aquí o allá, hay ciertos detalles finos que sí nos importan. Profundamente. Existimos porque nuestros arreglos específicos de partículas ganaron la batalla contra una asombrosa variedad de otros arreglos que competían por realizarse. Por la gracia del azar, canalizado a través de las leyes de la naturaleza, estamos aquí.

Es una realización que resuena en cada etapa del desarrollo humano y cósmico. Piense en lo que Richard Dawkins describió como la casi infinita colección de personas potenciales, portadoras de la casi infinita colección de secuencias de pares de bases en el ADN, ninguna de las cuales nacerá jamás. O piense en los momentos que constituyen la historia cósmica, desde el Big Bang, pasando por su nacimiento y hasta hoy, llena de procesos cuánticos cuya implacable progresión probabilística en cada una de las casi ilimitadas coyunturas podría haber dado ese resultado en lugar de éste, dando lugar a un universo igualmente sensato pero que no nos incluiría ni a usted ni a mí. [10] Y sin embargo, con este número astronómico de posibilidades, en contra de las sorprendentes probabilidades, tu secuencia de pares de bases y la mía, tu combinación molecular y la mía existen ahora. Qué espectacularmente improbable. Qué emocionantemente magnífico.

Y el don es aún mayor: nuestras particulares combinaciones moleculares, nuestras específicas disposiciones químicas y biológicas y neurológicas, nos dan los envidiables poderes que han ocupado gran parte de nuestra atención en capítulos anteriores. Mientras que la mayoría de la vida, milagrosa por sí misma, está atada a lo inmediato, podemos salirnos del tiempo. Podemos pensar en el pasado, podemos imaginar el futuro. Podemos tomar el universo, podemos procesarlo, podemos explorarlo con la mente y el cuerpo, con

la razón y la emoción. Desde nuestro solitario rincón del cosmos hemos usado la creatividad y la imaginación para dar forma a palabras e imágenes y estructuras y sonidos para expresar nuestros anhelos y frustraciones, nuestras confusiones y revelaciones, nuestros fracasos y triunfos. Hemos utilizado el ingenio y la perseverancia para tocar los límites mismos del espacio exterior e interior, determinando leyes fundamentales que rigen la forma en que brillan las estrellas y viaja la luz, cómo transcurre el tiempo y se expande el espacio, leyes que nos permiten mirar hacia atrás hasta el momento más breve después del comienzo del universo y luego cambiar nuestra mirada y contemplar su final.

Acompañando a estos impresionantes conocimientos están las profundas y persistentes preguntas. ¿Por qué hay algo en lugar de nada? ¿Qué provocó el inicio de la vida? ¿Cómo surgió la conciencia consciente? Hemos explorado una serie de especulaciones, pero las respuestas definitivas siguen siendo difíciles de encontrar. Tal vez nuestros cerebros, bien adaptados para la supervivencia en el planeta Tierra, no están estructurados para resolver estos misterios. O quizás, a medida que nuestra inteligencia continúa evolucionando, nuestro compromiso con la realidad adquirirá un carácter totalmente diferente, con el resultado de que las preguntas de hoy en día se vuelven irrelevantes. Aunque cualquiera de las dos cosas es posible, el hecho de que el mundo tal como lo entendemos ahora, con sus misterios y todo, se mantenga unido con una coherencia matemática y lógica tan estrecha, y el hecho de que hayamos sido capaces de descifrar gran parte de esa coherencia, me sugiere que no es así. No nos falta la capacidad cerebral. No estamos mirando fijamente a la pared de Platón, sin ser conscientes de un tipo de verdad radicalmente diferente, que está fuera de nuestro alcance, con el poder de proporcionar repentinamente una nueva y sorprendente claridad.

Mientras nos precipitamos hacia un frío y estéril cosmos, debemos aceptar que no hay un gran diseño. Las partículas no están dotadas de un propósito. No hay una respuesta final flotando en las profundidades del espacio esperando ser descubierta. En su lugar, ciertas colecciones especiales de partículas pueden pensar, sentir y reflejar, y dentro de estos mundos subjetivos pueden crear un propósito. Y así, en nuestra búsqueda por comprender la condición humana, la única dirección para mirar es hacia adentro. Esa es la noble dirección para mirar. Es una dirección que renuncia a respuestas ya hechas y se dirige al viaje altamente personal de construir nuestro propio significado. Es una dirección que nos lleva al corazón de la expresión creativa y a la fuente de nuestras narrativas más resonantes. La ciencia es una herramienta poderosa y exquisita para captar una realidad externa. Pero dentro de esa rúbrica, dentro de esa comprensión, todo lo demás es la especie humana contemplándose a sí misma, comprendiendo lo que necesita para continuar, y contando una historia que reverbera en la oscuridad, una historia tallada en el sonido y grabada en el silencio, una historia que, en el mejor de los casos, conmueve el alma.

Agradecimientos

Estoy agradecido a las muchas personas que me dieron sus valiosos comentarios mientras escribía "*Hasta el fin de los tiempos"*. Por leer atentamente el manuscrito, a veces más de una vez, y ofrecer perspectivas, críticas y sugerencias que mejoraron sustancialmente la presentación, debo un gran agradecimiento a Raphael Gunner, Ken Vineberg, Tracy Day, Michael Douglas, Saakshi Dulani, Richard Easther, Joshua Greene, Wendy Greene, Raphael Kasper, Eric Lupfer, Markus Pössel, Bob Shaye y Doron Weber. Por leer y responder cuidadosamente a secciones o capítulos particulares, y/o responder a preguntas, agradezco a David Albert, Andreas Albrecht, Barry Barish, Michael Bassett, Jesse Bering, Brian Boyd, Pascal Boyer, Vicki Carstens, David Chalmers, Judith Cox, Dean Eliott, Jeremy England, Stuart Firestein, Michael Graziano, Sandra Kaufmann, Will Kinney, Andrei Linde, Avi Loeb, Samir Mathur, Peter de Menocal, Brian Metzger, Ali Mousami, Phil Nelson, Maulik Parikh, Steven Pinker, Adam Riess, Benjamin Smith, Sheldon Solomon, Paul Steinhardt, Giulio Tononi, John Valley y Alex Vilenkin. Doy las gracias a todo el equipo de Knopf, incluyendo a la editora Amy Ryan, al editor asistente Andrew Weber, al diseñador Chip Kidd, a la editora de producción Rita Madrigal y a mi editor, Edward Kastenmeier, que ofreció muchas sugerencias muy perspicaces y, junto con mi agente, Eric Simonoff, apoyó plenamente el proyecto en todas las etapas de su desarrollo. Por último, mi más sincera gratitud por el constante amor y apoyo de mi familia: mi madre, Rita Greene; mis hermanos, Wendy Greene, Susan Greene y Joshua Greene; mis hijos, Alec Day Greene y Sophia Day Greene; y mi maravillosa esposa y más querida amiga, Tracy Day.

Notas

Prefacio

1.La cita es de uno de mis primeros mentores, un estudiante graduado en el departamento de matemáticas de la Universidad de Columbia en la década de 1970, Neil Bellinson, quien generosamente dio su tiempo y su talento único para enseñar matemáticas a un joven estudiante que no tenía nada que ofrecer salvo una pasión por el aprendizaje. Estábamos discutiendo un trabajo sobre la motivación humana que estaba escribiendo para un curso de psicología en Harvard enseñado por David Buss, ahora en la Universidad de Texas en Austin.

2.Oswald Spengler, *Decline of the West* (Nueva York: Alfred A. Knopf, 1986), 7.

3. Ibídem, 166.

4.Otto Rank, *Arte y Artista: Impulso creativo y desarrollo de la personalidad*, trans. Charles Francis Atkinson (Nueva York: Alfred A. Knopf, 1932), 39.

5.Sartre articula esta perspectiva a través de las reflexiones del personaje condenado Pablo Ibbieta en su maravilloso cuento "El Muro". Jean-Paul Sartre, *El muro y otras historias*, trans. Lloyd Alexander (Nueva York: New Directions Publishing, 1975), 12.

Capítulo 1: La atracción de la eternidad

1.William James, *Las variedades de la experiencia religiosa: A Study in Human Nature* (New York: Longmans, Green, and Co., 1905), 140.

2.Ernest Becker, *The Denial of Death* (New York: Free Press, 1973), 31. Becker acreditó a Otto Rank como su influencia dominante.

3.Ralph Waldo Emerson, *The Conduct of Life* (Boston y Nueva York: Houghton Mifflin Company, 1922), nota 38, 424.

4.E. O. Wilson invoca la palabra "consiliencia" para describir su visión de un encuentro de conocimientos dispares para lograr una comprensión más profunda. E. O. Wilson, *Consilience: The Unity of Knowledge* (Nueva York: Vintage Books, 1999).

5. En capítulos posteriores examinaré las pruebas que sugieren una influencia generalizada de la conciencia emergente de la humanidad sobre la mortalidad, pero como hay pocos o ningún dato incontrovertible que atestigüe la antigua mentalidad humana, la conclusión no es universalmente aceptada. Para una perspectiva alternativa, que argumenta que la ansiedad por la muerte es una aflicción moderna, véase por ejemplo Philippe Ariès, *La hora de nuestra muerte*, trans. Helen Weaver (Nueva York: Alfred A. Knopf, 1981). La perspectiva de Becker, basada en las ideas de Otto Rank, es que la ansiedad de muerte está profundamente arraigada en la especie.

6.Vladimir Nabokov, Habla, *Memoria: An Autobiography Revisited* (Nueva York: Alfred A. Knopf, 1999), 9.

7. Robert Nozick, "Filosofía y el significado de la vida", en "Vida, *muerte y significado": Key Philosophical Readings on the Big Questions*, ed. David Benatar (Lanham, MD: The Rowman & Littlefield Publishing Group, 2010), 73-74.

8. Emily Dickinson, *Los poemas de Emily Dickinson*, lectura de ed., ed. R. W. Franklin (Cambridge, MA: The Belknap Press of Harvard University Press, 1999), 307.

9. Henry David Thoreau, *The Journal, 1837-1861* (Nueva York: New York Review Books Classics, 2009), 563.

10. Franz Kafka, *The Blue Octavo Notebooks*, trans. Ernst Kaiser y Eithne Wilkens, ed. Max Brod (Cambridge, MA: Exact Change, 1991), 91.

Capítulo 2: El lenguaje del tiempo

1. La emisión, en el Tercer Programa de la BBC, el 28 de enero de 1948, a las 9:45 p.m., fue de un debate que tuvo lugar el año anterior. https://genome.ch.bbc.co.uk/35b8e9bdcf60458c976b882d80d9937f.

2. Bertrand Russell, *Why I Am Not a Christian* (New York: Simon & Schuster, 1957), 32-33.

3. Esta es, por supuesto, una descripción muy simplificada de una máquina de vapor, modelada en el llamado *ciclo Carnot*, que implica cuatro pasos: 1) El vapor en un recipiente absorbe el calor de una fuente (generalmente descrita como un depósito de calor) mientras empuja contra un pistón, haciendo el trabajo a una temperatura constante. (2) El canister se desconecta de la fuente de calor y se le permite continuar empujando el pistón, realizando ahora el trabajo a medida que la temperatura del vapor desciende (pero su entropía es constante, ya que no hay flujo de calor). (3) El canister se conecta entonces a un segundo depósito de calor, a una temperatura más baja que la primera, y se trabaja a esta temperatura constante más baja para deslizar el pistón de nuevo hacia su posición original, expulsando el calor residual en el proceso. (4) Finalmente, el canister se desconecta del depósito más frío mientras se sigue trabajando en el pistón, completando su viaje de vuelta a su posición original, ya que la temperatura del vapor también se eleva a su valor original. El ciclo entonces comienza de nuevo. En un motor de vapor real -a diferencia del teórico que analizamos matemáticamente- estos pasos, o los que son comparables, se llevan a cabo en una variedad de formas dictadas por cuestiones de ingeniería y practicidad.

4. Sadi Carnot, *Reflections on the Motive Power of Fire* (Mineola, NY: Dover Publications, Inc., 1960).

5. Modelar una pelota de béisbol como una sola partícula masiva sin estructura interna es una aproximación grosera de la propia pelota. Sin embargo, la aplicación de las leyes de Newton a este modelo aproximado de la pelota de béisbol produce el movimiento clásico exacto del centro de masa de la pelota. Para el centro de movimiento de la masa, la tercera ley de Newton asegura que todas las fuerzas internas se anulan entre sí y así el centro de movimiento de la masa depende únicamente de las fuerzas externas aplicadas.

6. Un estudio (B. Hansen, N. Mygind, "¿Con qué frecuencia estornudan y se suenan la nariz las personas normales?" *Rhinology* 40, no. 1 [Mar. 2002]: 10-12) concluyó que, en promedio, la gente estornuda una vez al día. Como hay alrededor de 7 mil millones de personas en la tierra, eso produce 7 mil millones de estornudos en todo el mundo por día. Dado que hay alrededor de 86.000 segundos en un día, encontramos alrededor de 80.000 estornudos por segundo en todo el mundo.

7. La descripción que he dado está bien como resumen a grandes rasgos, pero hay sistemas físicos más exóticos en los que para asegurar que las leyes de la física permitan las secuencias inversas debemos someter el sistema a otras dos manipulaciones más allá de la inversión del tiempo: también debemos invertir las cargas de todas las partículas (la llamada *conjugación de cargas*) y también invertir los papeles de la mano izquierda y la mano derecha (la llamada *inversión de la paridad)*. Las leyes de la física, tal como se entienden actualmente, respetan necesariamente la conjunción de estas tres inversiones, algo que se conoce como teorema *CPT* (donde C significa conjugación de cargas, P significa inversión de paridad y T significa inversión del tiempo).

8. Para dos colas, el cálculo es (100 × 99)/2 = 4.950; para tres colas, (100 × 99 × 98)/3! = 161.700; para cuatro colas, (100 × 99 × 98 × 97)/4! = 3.921.225; para cinco colas (100 × 99 × 98 × 97 × 96)/5! = 75.287.520; para 50 colas $(100!/(50!)^2)$ = 100.891.344.545.564.193.334.812.497.256.

9. Más precisamente, la entropía es el *logaritmo* del número de miembros de un grupo determinado, una distinción matemática esencial que garantiza que la entropía tiene propiedades físicas sensatas (por ejemplo, cuando dos sistemas se unen, sus entropías se suman), pero que para nuestra discusión cualitativa podemos ignorar con seguridad. En algunas partes del capítulo 10, utilizaremos implícitamente la definición más precisa, pero por ahora estamos bien.

10. En este ejemplo, para facilidad pedagógica, consideraremos sólo las moléculas de vapor de H2O- que están flotando en su baño. Ignoramos el papel del aire y de cualquier otra sustancia que esté presente. Por simplicidad, también ignoramos la estructura interna de las moléculas de agua y las tratamos como partículas puntuales sin estructura. Cuando nos referimos a la temperatura del vapor, tenemos en cuenta que el agua líquida pasa a ser vapor a 100º C, pero una vez formada la temperatura del vapor puede elevarse aún más.

11. Físicamente, la temperatura es proporcional a la energía cinética media de las partículas, por lo que se calcula matemáticamente promediando el cuadrado de la velocidad de cada partícula. Para nuestros propósitos, pensar en la temperatura en términos de velocidad media, la magnitud de la velocidad, es adecuado.

12. Más precisamente, la primera ley de la termodinámica es una versión de la ley de conservación de la energía que i) reconoce el calor como una forma de energía y ii) tiene en cuenta el trabajo realizado por o sobre un sistema determinado. La conservación de la energía afirma, por lo tanto, que el cambio de la energía interna de un sistema surge de la diferencia entre el calor neto que absorbe y el trabajo neto que realiza. El lector particularmente bien informado puede observar que cuando consideramos la energía y su conservación en un conjunto global -a través de la totalidad del universo- surgen sutilezas. No necesitaremos explorarlas, así que podemos asumir con seguridad la afirmación directa de que la energía se conserva.

13. Como en el ejemplo del vapor en su baño, en el que ignoré las moléculas de aire, por simplicidad no estoy considerando explícitamente las colisiones entre las moléculas calientes liberadas por el pan de molde y las moléculas más frías de aire que pasan por su cocina y por el resto de su casa. Tales colisiones, en promedio, aumentarían la velocidad de las moléculas de aire y disminuirían la velocidad de las liberadas por el pan, llevando finalmente a ambos tipos de moléculas a la misma temperatura. La disminución de la temperatura de las moléculas de pan actuaría para reducir su entropía, pero el aumento de la temperatura de las moléculas de aire daría lugar a un aumento entrópico más que compensatorio, por lo que la entropía combinada de ambos grupos aumentaría efectivamente. En la versión simplificada que he descrito, se puede pensar que la velocidad media de las moléculas liberadas por el pan de molde permanece constante a medida que se extienden; su temperatura permanecería así fija, y por lo tanto el aumento de su entropía se debería a que se llenan en mayor volumen.

14. Para el lector matemáticamente informado, hay una suposición técnica clave que subyace a esta discusión (así como la mayoría de los tratamientos de la mecánica estadística en los libros de texto y en la literatura de investigación). Dado cualquier macroestado, *hay* microestados compatibles que evolucionarán hacia configuraciones de menor entropía. Por ejemplo, consideremos la versión invertida en el tiempo de cualquier desdoblamiento que produzca un microestado dado a partir de una configuración anterior de menor entropía. Tal microestado "invertido en el tiempo" evolucionaría hacia una entropía menor. Generalmente, categorizamos tales microestados como "raros" o "altamente afinados". Matemáticamente, tal categorización requiere la especificación de una *medida* en el espacio de las configuraciones. En situaciones familiares, el uso de la medida uniforme en tal espacio hace que las condiciones iniciales de disminución de la entropía sean "raras", es decir, de pequeña medida. Sin embargo, según una medida que se haya escogido para alcanzar un máximo en torno a esas configuraciones iniciales de disminución de la entropía, no serían raras por su diseño. Por lo que

sabemos, la elección de la medida es empírica; para los tipos de sistemas que encontramos en la vida cotidiana, la medida uniforme produce predicciones que concuerdan con las observaciones, y también lo es la medida que invocamos. Pero es importante señalar que la elección de la medida se justifica por el experimento y la observación. Cuando consideramos situaciones exóticas (como el universo primitivo) para las que carecemos de datos análogos que nos lleven a una elección particular de la medida, debemos reconocer que nuestras intuiciones sobre lo "raro" o "genérico" no tienen la misma base empírica.

15. Hay algunos puntos relevantes, que se han pasado por alto en este párrafo, que afectan al significado de un estado de "entropía máxima" cuando se aplica al universo. En primer lugar, en este capítulo no estamos tomando en consideración el papel de la gravedad. En el capítulo 3, lo haremos. Y como veremos, la gravedad tiene un profundo impacto en la naturaleza de las configuraciones de partículas de alta entropía. De hecho, aunque no será nuestro objetivo, en un volumen finito dado del espacio la configuración de entropía máxima es un agujero negro -un objeto profundamente dependiente de la gravedad- que llena completamente el volumen espacial (para más detalles, ver, por ejemplo, mi libro *El tejido del cosmos, capítulo* 6 y capítulo 16). En segundo lugar, si consideramos las regiones arbitrariamente grandes del espacio -incluso infinitamente grandes-, las configuraciones de entropía más altas de una cantidad dada de materia y energía son aquellas en las que las partículas constituyentes (materia y/o radiación) están distribuidas uniformemente en un volumen cada vez mayor. De hecho, los agujeros negros, como veremos en el capítulo 10, se evaporan en última instancia (mediante un proceso descubierto por Stephen Hawking), dando lugar a configuraciones de mayor entropía en las que las partículas se dispersan cada vez más. En tercer lugar, para el propósito de esta sección, el único hecho que necesitamos es que la entropía presente actualmente en cualquier volumen dado del espacio no está en su valor máximo. Si ese volumen contuviera, digamos, la habitación que usted está habitando ahora, la entropía aumentaría si todas las partículas que lo componen a usted, a sus muebles y a cualquier otra estructura material de la habitación se colapsaran en un pequeño agujero negro, que posteriormente se evaporaría produciendo partículas que se propagarían a través de un volumen de espacio aún mayor. La mera existencia de interesantes estructuras materiales - estrellas, planetas, vida, etc. - implica que la entropía es menor de lo que potencialmente podría ser. Son tales configuraciones especiales, comparativamente de baja entropía, que requieren una explicación de cómo surgieron. En el próximo capítulo, aceptaremos este desafío.

16. Para el lector particularmente diligente, hay un detalle adicional que vale la pena explicar. Cuando el vapor empuja el pistón, gasta parte de la energía que absorbió del combustible, pero en el proceso el vapor no cede nada de su entropía al pistón (suponiendo que el pistón tenga la misma temperatura que el vapor). Después de todo, el hecho de que el pistón esté *aquí* o, habiendo sido empujado, esté a una corta distancia de *aquí* no tiene ningún impacto en su orden o desorden interno; su entropía no cambia. Y sin que la entropía se transfiera al pistón, la entropía permanece completamente dentro del propio vapor. Esto significa que a medida que el pistón se reajusta a su posición original, listo para el siguiente empuje, el vapor debe de alguna manera expulsar todo el exceso de entropía que está albergando. Esto se logra, como se enfatizó en el capítulo, mediante la máquina de vapor que expulsa el calor a su entorno.

17. Bertrand Russell, *Why I Am Not a Christian* (Nueva York: Simon & Schuster, 1957), 107.

Capítulo 3: Orígenes y Entropía

1. Georges Lemaître, *"Recontres avec Einstein", Revue des questions scientifiques* 129 (1958): 129-32.

2. La historia completa de la conversión de Einstein a un universo en expansión involucró dos factores. En primer lugar, Arthur Eddington demostró matemáticamente que la anterior propuesta de Einstein de un

universo estático sufría de un fallo técnico: la solución era inestable, lo que significaba que si se empujaba a la expansión del espacio para que se expandiera ligeramente, entonces continuaría expandiéndose; si se empujaba para que se contrajera ligeramente, continuaría contrayéndose. En segundo lugar, el caso de la observación, como se examina en este capítulo, dejó cada vez más claro que el espacio no es estático. La combinación de ambas realizaciones convenció a Einstein de que abandonara la noción de un universo estático (aunque algunos han argumentado que las consideraciones teóricas pueden haber tenido la influencia más significativa). Para más detalles de esta historia, véase Harry Nussbaumer, "Einstein's conversion from his static to an expanding universe", *European Physics Journal-History* 39 (2014): 37-62.

3. Alan H. Guth, "Universo inflacionario: A possible solution to the horizon and flatness problems", *Physical Review D* 23 (1981): 347. El término técnico para el "combustible cósmico" es un campo *escalar*. A diferencia de los campos eléctricos y magnéticos más conocidos que proporcionan un vector en cada lugar del espacio (la magnitud y la dirección del campo eléctrico o magnético en el lugar), un campo escalar proporciona sólo un único número en cada lugar del espacio (números a partir de los cuales se puede determinar la energía y la presión del campo). Obsérvese que el documento de Guth, y muchos tratamientos posteriores, destacan el papel de la inflación en el tratamiento de una serie de cuestiones cosmológicas que anteriormente habían obstaculizado a los investigadores: el problema del monopolio, el problema del horizonte y el problema de la planicie son los más prominentes. Para una discusión accesible y esclarecedora de estas cuestiones, véase Alan Guth, *The Inflationary Universe* (Nueva York: Basic Books, 1998). Siguiendo a Guth, me gusta motivar la inflación planteando el problema más intuitivo de identificar el empuje hacia afuera que impulsó la expansión espacial del big bang.

4. El enfriamiento al que me refiero tiene lugar después de que el estallido inflacionario haya concluido y el universo haya entrado en una fase de expansión espacial menos rápida pero aún significativa. Para simplificar, he dejado fuera algunos pasos intermedios en el desarrollo cosmológico. El universo primitivo se enfrió porque gran parte de la energía que contenía era transportada por ondas electromagnéticas, y tales ondas se extienden a medida que el espacio se expande. Esta elongación de las ondas electromagnéticas -el llamado corrimiento al rojo de la radiación- disminuye su energía y reduce su temperatura general. Nótese, sin embargo, que aunque la temperatura se está enfriando, la entropía general está aumentando debido a la expansión del volumen del espacio.

5. Hay una perspectiva minoritaria que sí atribuye la niebla a una limitación cuántica inherente en la precisión de las mediciones y no a una realidad fundamentalmente borrosa. En este enfoque - normalmente llamado "mecánica de Bohmian", en honor al físico David Bohm, pero a veces denominado "teoría de de Broglie-Bohm", incluida la atribución al premio Nobel Louis de Broglie- las partículas retienen trayectorias agudas y definidas. Las trayectorias son diferentes de las predichas por la física clásica (hay una fuerza cuántica adicional que actúa sobre las partículas a medida que se mueven), pero para utilizar el lenguaje del capítulo, esas trayectorias podrían trazarse con una pluma afilada. La incertidumbre y la falta de claridad de la formulación más tradicional de la mecánica cuántica se presenta como una incertidumbre estadística con respecto a las condiciones iniciales de cualquier partícula dada. La diferencia entre las dos perspectivas, si bien es esencial para el cuadro de la realidad que cada teoría pinta, no tiene prácticamente ningún impacto en las predicciones cuantitativas.

6. La cosmología inflacionaria es un marco de teorías, en contraposición a una teoría específica basada en la premisa de que durante una fase temprana de su desarrollo el universo experimentó un breve período de rápida expansión acelerada. La manera precisa en que surgió esta fase y los detalles precisos de su desarrollo varían de una formulación matemática a otra. Las versiones más simples están en tensión con los datos de observación cada vez más precisos, lo que ha desplazado la atención a versiones algo más complejas de la teoría inflacionaria. Los detractores sostienen que las versiones más complejas son menos convincentes y que, además, estas versiones demuestran que el paradigma inflacionario es demasiado flexible para que los datos puedan descartarlo. Los defensores sostienen que todo lo que

estamos presenciando es la progresión natural de la ciencia: continuamente ajustamos nuestras teorías para alinearlas con la información más precisa proporcionada por las mediciones de observación y las preocupaciones matemáticas. Más generalmente, y en términos más técnicos, una afirmación ampliamente aceptada por los cosmólogos es que el universo experimentó una fase durante la cual el tamaño del horizonte de movimiento disminuyó. Lo que no está tan claro es si esa fase está correctamente descrita por la cosmología inflacionaria, en la que la dinámica está impulsada por la energía uniforme que baña el espacio suministrada por un campo escalar (véase la nota 3 de este capítulo), como he descrito, o si esa fase puede haber surgido a través de un mecanismo diferente (como las cosmologías de rebote, la inflación de las branas, los mundos de branas en colisión, las teorías de la velocidad variable de la luz, entre otras que han propuesto los físicos). En el capítulo 10, examinaremos brevemente la posibilidad de una cosmología de rebote, tal como la desarrollaron Paul Steinhardt, Neil Turok y varios de sus colaboradores, en la que el universo experimenta numerosos ciclos de evolución cosmológica.

7. Para el lector particularmente diligente, permítanme abordar un punto importante que sigue la discusión. Si todo lo que sabe sobre un sistema físico dado es que tiene menos del máximo de entropía disponible, entonces la segunda ley de la termodinámica le permite sacar no una sino dos conclusiones: la evolución más probable del sistema hacia el futuro aumentará su entropía *y* la evolución más probable del sistema hacia el pasado también aumentará su entropía. Tal es la carga de las leyes simétricas del tiempo, ecuaciones que operan exactamente de la misma manera ya sea que la evolución del estado actual hacia el futuro o hacia el pasado. El desafío es que el pasado de entropía superior al que conducen tales consideraciones es incompatible con el pasado de entropía inferior atestiguado por la memoria y los registros. (Recordamos que los cubos de hielo parcialmente derretidos anteriormente estaban menos derretidos, por lo que tenían menor entropía, no más derretidos, lo que sería mayor entropía). Más concretamente, un pasado de alta entropía socavaría nuestra confianza en las propias leyes de la física porque tal pasado no incluiría los experimentos y observaciones que apoyan las leyes en sí mismas. Para evitar tal pérdida de confianza en nuestra comprensión debemos *hacer cumplir* un pasado de baja entropía. Generalmente, lo hacemos introduciendo un nuevo supuesto, uno llamado la hipótesis del *pasado* por el filósofo David Albert, que declara que la entropía está anclada en un valor bajo cerca del big bang y en promedio ha estado creciendo desde entonces. Este es el enfoque que hemos adoptado implícitamente en este capítulo. En el capítulo 10, analizaremos explícitamente la improbable pero concebible posibilidad de que un estado de baja entropía emerja de una configuración previa de alta entropía. Para los antecedentes y más detalles, ver el capítulo 7 de "El tejido *del cosmos"*.

8. Las descripciones matemáticas de la entropía lo hacen preciso: dentro de cualquier región, hay muchas más maneras de que el valor de un campo varíe (más alto aquí, más bajo allá, mucho más bajo allá, y así sucesivamente) que maneras de que sea uniforme (el mismo valor en cada lugar), y así las condiciones requeridas tienen baja entropía. Sin embargo, hay una suposición técnica oculta que es importante destacar. Para mayor facilidad, utilizaré el lenguaje clásico, pero las consideraciones tienen una traducción directa a la física cuántica. En el micromundo, ninguna configuración de partículas o campos se destaca fundamentalmente sobre ninguna otra y por lo tanto generalmente consideramos que cada una es tan probable como cualquier otra. Pero esta es una suposición que se basa en lo que los filósofos llaman el *principio de indiferencia*. Sin evidencia a priori que distinga una configuración microscópica de otra, les asignamos iguales probabilidades de ser realizadas. Cuando cambiamos nuestro enfoque al macromundo, la probabilidad de un macroestado frente a otro se determina entonces por la proporción del número de microestados que produce cada uno. Si hay el doble de microestados que producen un macroestado particular comparado con los que producen otro, ese macroestado tiene el doble de probabilidades de ocurrir.

Sin embargo, observe que fundamentalmente, la justificación del principio de indiferencia debe tener una base empírica. De hecho, la experiencia común confirma la validez de una multitud de usos, implícitos aunque sean, del principio de indiferencia. Tomemos nuestro ejemplo de los centavos arrojados. Suponiendo que cada "microestado" de las monedas (estado especificado mediante la enumeración de la disposición de cada moneda, como la moneda 1 es cara, la moneda 2 es cruz, la moneda 3 es cruz, y así sucesivamente) es tan probable como cualquier otro, concluimos que son más probables esas disposiciones "macroscópicas" (estados especificados únicamente mediante la indicación del número total de cara y cruz, no la disposición de las monedas individuales) que pueden realizarse por muchos microestados. Cuando arrojamos las monedas, esta suposición se confirma empíricamente por la rareza de los resultados que pueden obtenerse sólo con un pequeño número de microestados (como todas las cabezas) y la ubicuidad de los que pueden obtenerse con un gran número de microestados (como la mitad de las cabezas y la mitad de las colas).

La relevancia de nuestra discusión cosmológica es que cuando decimos que un parche uniforme de campo de inflado es "improbable", estamos invocando de manera similar el principio de indiferencia. Estamos asumiendo implícitamente que cada posible configuración microscópica del campo (el valor preciso del campo en cada lugar) es tan probable como cualquier otra, de modo que, de nuevo, la probabilidad de una configuración macroscópica dada es proporcional al número de microestados que la realizan. Sin embargo, a diferencia del caso de los centavos arrojados, no tenemos pruebas empíricas que apoyen esta suposición. El hecho de que parezca razonable se basa en nuestra experiencia en el mundo macroscópico cotidiano, en el que el principio de indiferencia se apoya en la observación. Pero para el desarrollo cosmológico, sólo conocemos una parte del experimento. Un enfoque empírico severo concluiría que, por muy especiales que parezcan algunas configuraciones basadas en el principio de indiferencia, si conducen al universo que observamos, entonces se las señala y, como clase, merecen ser llamadas no sólo "probables" sino "definitivas" (con sujeción al carácter provisional habitual de todas las explicaciones científicas). Matemáticamente, tal cambio en lo que llamamos probable e improbable se conoce como un cambio en la medida sobre el espacio de configuración (véase el capítulo 2, nota 14). La medida inicial, que asigna probabilidades iguales a cada configuración posible, se denomina medida "plana". Así pues, las observaciones pueden motivar la introducción de una medida "no plana" que señale como más probables ciertas clases de configuraciones.

Los físicos no suelen estar satisfechos con ese enfoque. Introducir una medida en un espacio de configuraciones para asegurar que se dé el mayor peso a las que conducen al mundo tal y como lo conocemos, parece algo que los físicos consideran "antinatural". Los físicos buscan una estructura matemática fundamental, de primeros principios, que produzca tal medida como salida en lugar de incluirla como parte de la entrada. Las cuestiones importantes son si esto es pedir demasiado y si el éxito simplemente haría que la cuestión retrocediera un paso más hacia los supuestos implícitos que subyacen en cualquier enfoque de los primeros principios. No se trata de preocupaciones puntillosas. Gran parte de los últimos treinta años de trabajo teórico en la física de partículas se ha dirigido a abordar cuestiones de ajuste en nuestras teorías más refinadas (ajuste del campo de Higgs en el modelo estándar de la física de partículas; ajuste necesario para abordar los problemas del horizonte y la planicie en la cosmología estándar del big bang). Por supuesto, tal investigación ha llevado a una profunda comprensión tanto de la física de partículas como de la cosmología, pero ¿podría llegar un punto en el que simplemente tengamos que aceptar ciertas características del mundo como dadas, sin una explicación más profunda? Me gusta pensar que la respuesta es no, al igual que a muchos de mis colegas. Pero no hay garantía de que este sea el caso.

9. Andrei Linde, comunicación personal, 15 de julio de 2019. El enfoque preferido de Linde es que la fase inflacionaria se inicie por un evento de túnel cuántico desde un reino de todas las geometrías y campos posibles, uno en el que los mismos conceptos de tiempo y temperatura pueden no tener aún significado. Utilizando juiciosamente los aspectos del formalismo cuántico, Linde ha argumentado que la creación cuántica de las condiciones que conducen a la expansión inflacionaria bien puede ser un proceso común en el universo temprano que no sufre ninguna supresión cuántica.

10. Es natural pensar que cuanto más potente sea un telescopio (cuanto más grande sea la antena, mayor será el tamaño del espejo, etc.), más lejos podrán resolverse los objetos. Pero hay un límite. Si un objeto

está tan lejos que cualquier luz que haya emitido desde su nacimiento no habría tenido tiempo suficiente para llegar a nosotros, entonces, independientemente del equipo que utilicemos, seremos incapaces de verlo. Decimos que tales objetos se encuentran más allá de nuestro horizonte cósmico, un concepto que jugará un papel particularmente importante en nuestra discusión sobre el futuro lejano en los capítulos 9 y 10. En la cosmología inflacionaria, el espacio se expande tan rápidamente que las regiones circundantes son efectivamente llevadas más allá de nuestro horizonte cósmico.

11. Sobre la base de pruebas indirectas (el movimiento de las estrellas y las galaxias), existe un amplio consenso en que el espacio está repleto de partículas de materia oscura, partículas que ejercen una fuerza gravitatoria pero que no absorben ni producen luz. Pero como la búsqueda de partículas de materia oscura hasta el momento ha llegado con las manos vacías, algunos investigadores han sugerido alternativas a la materia oscura en las que las observaciones se explican mediante modificaciones de la ley de la fuerza gravitatoria. Con el continuo fracaso de numerosos experimentos en curso para detectar directamente las partículas de materia oscura, las teorías alternativas están atrayendo una mayor atención.

12. La dirección del flujo de calor, de las sustancias o ambientes más calientes a los más fríos, es una consecuencia directa de la segunda ley de la termodinámica. Cuando el café caliente se enfría a temperatura ambiente, transfiriendo parte de su calor a las moléculas de aire de la habitación, el aire se calienta ligeramente y así aumenta su entropía. El aumento de la entropía del aire supera la disminución de la entropía del café que se enfría, asegurando que la entropía general aumente. Matemáticamente, el cambio de entropía de un sistema viene dado por el cambio de su calor dividido por su temperatura ($\Delta S = \Delta QT$, donde S denota entropía, Q denota calor y T denota temperatura). Cuando el calor fluye de un sistema más caliente a uno más frío, la magnitud del cambio de calor para cada sistema es la misma, pero como muestra la ecuación, la disminución de la entropía del sistema más caliente es menor que el aumento de la temperatura del más frío (debido al factor de T en el denominador), por lo que el cambio neto producirá un aumento general de la entropía.

13. Desde el punto de vista de la conservación de la energía, a medida que las moléculas se mueven hacia afuera, su energía potencial gravitacional aumenta, y así su energía cinética disminuye.

14. Para el lector con inclinación matemática y formación física, puede entender esto con un cálculo de fondo utilizando la mecánica estadística clásica, en la que la entropía es proporcional al volumen del espacio de fase. Supongamos que la nube de gas que se encoge satisface el (famoso) teorema de virial, que relaciona la energía cinética media de las partículas, *K*, con su energía potencial media, *U*, vía $K = -U/2$. Entonces, como la energía potencial gravitatoria es proporcional a 1/R, con *R* el radio de la nube, vemos que *K* es también proporcional a 1/R. Además, como la energía cinética es proporcional al cuadrado de las velocidades de las partículas, aprendemos que la velocidad media de las partículas es proporcional a $1/\sqrt{R}$. El volumen espacial de fase accesible a las partículas de la nube es, por lo tanto, proporcional a $R3(1/\sqrt{R})^3$ donde el primer factor representa el volumen espacial accesible a las partículas y el segundo factor representa el volumen espacial de momento accesible a las partículas. Vemos que la disminución del volumen espacial domina sobre el aumento del volumen del espacio de impulso, produciendo una disminución general de la entropía a medida que la nube se contrae. Obsérvese también que el teorema de virial asegura que a medida que la nube se encoge, la disminución de la energía potencial supera el aumento de la energía cinética (debido al factor "2" del teorema que relaciona K y U), de modo que no sólo disminuye la entropía de la parte de la nube que se encoge, sino que también disminuye su energía. Esa energía se irradia a la cáscara circundante, cuya energía aumenta, al igual que su entropía.

Capítulo 4: Información y vitalidad

1. Carta de F. H. C. Crick a E. Schrödinger, 12 de agosto de 1953.

2.J. D. Watson y F. H. C. Crick, "Molecular Structure of Nucleic Acids: A Structure for Deoxyribose Nucleic Acid", *Nature* 171 (1953): 737-38. La figura central del descubrimiento fue la química y cristalógrafa Rosalind Franklin, cuya "fotografía 51" fue proporcionada sin su conocimiento a Watson y Crick por Wilkins. Fue esta fotografía la que contribuyó a que Watson y Crick completaran el modelo de doble hélice del ADN. Franklin murió en 1958, cuatro años antes de que se otorgara el Premio Nobel por desentrañar la estructura del ADN, y el Nobel no puede otorgarse a título póstumo. Si Franklin hubiera seguido vivo, no está claro cómo habría actuado el comité del Nobel. Véase, por ejemplo, Brenda Maddox, *Rosalind Franklin: La dama oscura del ADN* (Nueva York: Harper Perennial, 2003).

3.Maurice Wilkins, *The Third Man of the Double Helix* (Oxford: Oxford University Press, 2003), 84.

4. Erwin Schrödinger, *¿Qué es la vida?* (Cambridge: Cambridge University Press, 2012), 3.

5.Revista *Time*, vol. 41, número 14 (5 de abril de 1943): 42.

6.Erwin Schrödinger, *¿Qué es la vida?* (Cambridge: Cambridge University Press, 2012), 87.

7.K. G. Wilson, "Fenómenos críticos en 3.99 dimensiones", *Physica* 73 (1974): 119. Ver la conferencia de Ken Wilson para una discusión semitecnica y referencias en ella: https://www.nobelprize.org.

8. En diversos aspectos, la noción de historias anidadas, a veces descritas como "niveles de comprensión" o "niveles de explicación", ha sido invocada por estudiosos de una amplia gama de disciplinas científicas. Los psicólogos hablan de explicar el comportamiento a un nivel biológico (invocando causas fisicoquímicas), a un nivel cognitivo (invocando funciones cerebrales de nivel superior) y a un nivel cultural (invocando influencias sociales); algunos científicos cognitivos (volviendo al neurocientífico David Marr) organizan la comprensión de los sistemas de procesamiento de la información en términos de un nivel computacional, un nivel algorítmico y un nivel físico. Común a muchos de los esquemas jerárquicos propugnados por los filósofos y físicos es el compromiso con *el naturalismo*, término que se utiliza a menudo pero que es difícil de definir con precisión. La mayoría de los que lo utilizan estarían de acuerdo en que el naturalismo rechaza las explicaciones que invocan entidades sobrenaturales y, en cambio, se basa únicamente en las cualidades del mundo natural. Por supuesto, para que esta posición sea precisa, es necesario especificar los límites discernibles de lo que constituye el mundo natural, una tarea que es más fácil de decir que de hacer. Las tablas y los árboles se encuentran directamente en su dominio, pero ¿qué pasa con el número cinco o el último teorema de Fermat? ¿Qué hay de la emoción de la alegría o la sensación del rojo? ¿Qué hay de los ideales de libertad inalienable y dignidad humana?

A lo largo de los años, preguntas como estas han inspirado muchas variaciones en el tema del naturalismo. Una posición extrema sostiene que el único conocimiento legítimo del mundo proviene de los conceptos y análisis de la ciencia, una posición que a veces se denomina "cientificismo". Aquí también, la perspectiva requiere que sus proponentes definan los términos con precisión: ¿Qué constituye la ciencia? Claramente, si se entiende por ciencia las conclusiones basadas en las observaciones, la experiencia y el pensamiento racional, los límites de la ciencia se extienden mucho más allá de las disciplinas que típicamente encontramos representadas en los departamentos de ciencia de las universidades. Como se puede imaginar, esto da lugar a afirmaciones de un significativo exceso de alcance de la ciencia.

Posiciones menos extremas enhebran un compromiso naturalista a través de varios principios organizativos. El filósofo Barry Stroud ha defendido lo que él llama "naturalismo expansivo o de mente abierta" en el que los límites explicativos no están fijados en piedra desde el principio. En su lugar, el naturalismo expansivo se reserva la libertad de construir capas de comprensión que invocan todo, desde los ingredientes materiales de la naturaleza hasta las cualidades psicológicas y las declaraciones matemáticas abstractas, como se requiere para explicar observaciones, experiencias y análisis (Barry Stroud, "The Charm of Naturalism", *Proceedings and Addresses of the American Philosophical Association* 70, no. 2 [noviembre

de 1996], 43-55). El filósofo John Dupré ha defendido el "naturalismo pluralista", que sostiene que el sueño de una unidad dentro de la ciencia es un mito peligroso, y en cambio nuestras explicaciones deben surgir de "proyectos de investigación diversos y superpuestos" que abarcan las ciencias tradicionales y más allá para incluir, entre otras disciplinas, la historia, la filosofía y las artes (John Dupré, "The Miracle of Monism", en *Naturalism in Question*, ed., Oxford University Press, 2003). Mario de Caro y David Macarthur [Cambridge, MA: Harvard University Press, 2004], 36-58). Stephen Hawking y Leonard Mlodinow introdujeron la noción de "realismo dependiente de modelos", que describe la realidad en términos de una colección de historias distintas, cada una de ellas basada en un modelo o marco teórico diferente para explicar las observaciones, ya sea en el micromundo de las partículas o en el macromundo de los sucesos cotidianos (Stephen Hawking y Leonard Mlodinow, *The Grand Design* [Nueva York: Bantam Books, 2010]). El físico Sean Carroll ha invocado el "naturalismo poético" para referirse a las explicaciones que amplían el naturalismo científico para incluir el lenguaje y los conceptos atendidos en diferentes dominios de interés (Sean Carroll, *The Big Picture* [Nueva York: Dutton, 2016]). Y como se señala en la nota 4 del capítulo 1, E. O. Wilson utiliza el término "consiliencia" para expresar la unión de conocimientos de disciplinas muy dispares para proporcionar una profundidad de comprensión que de otro modo sería inalcanzable.

No me gusta mucho la jerga, pero si tuviera que etiquetar mi propio punto de vista, el que guiará nuestra discusión a través de este libro, lo llamaría "naturalismo anidado". El naturalismo anidado, como quedará claro en este y en los siguientes capítulos, está comprometido con el valor y la aplicabilidad universal del reduccionismo. Da por sentado que hay una unidad fundamental en el funcionamiento del mundo, y postula que tal unidad se encontrará al seguir el programa reduccionista a cualquier profundidad que lleve. Todo lo que ocurre en el mundo admite una descripción en términos de los constituyentes fundamentales de la naturaleza siguiendo los dictados de las leyes fundamentales de la naturaleza. El naturalismo anidado también enfatiza, sin embargo, que tal descripción tiene un poder explicativo limitado. Hay muchos otros niveles de comprensión que envuelven el relato reduccionista de la misma manera que las partes externas de un nido envuelven su estructura más interna. Y dependiendo de las cuestiones que se persigan, estas otras historias explicativas pueden proporcionar relatos mucho más perspicaces que el proporcionado por el reduccionismo. Todos los relatos deben ser mutuamente consistentes, pero pueden surgir nuevos y útiles conceptos en niveles más altos que no admiten correlaciones de nivel inferior. Por ejemplo, cuando se estudian muchas moléculas de agua, el concepto de una ola de agua es a la vez sensato y útil. Cuando se estudia una sola molécula de agua, no lo es. Del mismo modo, al explorar las ricas y variadas historias de la experiencia humana, el naturalismo anidado invoca libremente los relatos en los niveles de estructura que resulten más esclarecedores, asegurándose al mismo tiempo de que los relatos se ajusten a una descripción coherente.

9. A lo largo de todo, todas las referencias a la "vida" implícitamente significan "la vida tal como la conocemos, en el planeta Tierra" y por lo tanto no voy a proporcionar esta calificación.

10. Un obstáculo importante en la formación de átomos con grandes pesos atómicos es que no hay núcleos estables que contengan cinco u ocho nucleones. A medida que los núcleos se acumulan añadiendo secuencialmente protones y neutrones (núcleos de hidrógeno y helio), la inestabilidad en los pasos cinco y ocho crea un cuello de botella que dificulta la nucleosíntesis del big bang.

11. Las proporciones que he dado proporcionan las abundancias relativas por masa. Dado que cada núcleo de helio es aproximadamente cuatro veces la masa de cada núcleo de hidrógeno, un recuento del número de átomos de hidrógeno comparado con el número de átomos de helio arroja una proporción diferente, aproximadamente 92 por ciento de hidrógeno y 8 por ciento de helio.

12. Para una historia completa véase Helge Kragh, "Nombrando el Big Bang", *Historical Studies in the Natural Sciences* 44, no. 1 (Febrero 2014): 3. Kragh ha sugerido que aunque Hoyle favoreció su propia teoría cosmológica (el modelo de estado estacionario, en el que el universo siempre existió), su uso del término "big bang" puede que no haya sido entendido de forma burlona. En cambio, Hoyle puede haber usado "big bang" como una forma colorida de distinguir su propia teoría de este competidor en particular.

13.S. E. Woosley, A. Heger y T. A. Weaver, "The evolution and explosion of massive stars", *Reviews of Modern Physics* 74 (2002): 1015.

14.Un estudio analizó cientos de miles de posibles trayectorias y llegó a la conclusión de que casi todas ellas habrían requerido que el sol fuera eyectado a una velocidad tan alta que, o bien perdería su disco protoplanetario, o bien, si los planetas ya se hubieran formado, se dispersarían (Bárbara Pichardo, Edmundo Moreno, Christine Allen, y otros, "The Sun was not born in M67", *The Astronomical Journal* 143, no. 3 [2012]: 73). Otro estudio, que hace una suposición diferente para el lugar donde se formó el propio Messier 67, concluyó que una velocidad de eyección más lenta podría ser adecuada para lanzar el sol en su camino, y con esta velocidad más lenta, los planetas o el disco protoplanetario se preservarían (Timmi G. Jørgensen y Ross P. Church, "Los escapes estelares de M67 pueden alcanzar órbitas galácticas similares a las del Sol", arxiv.org, arXiv:1905.09586).

15.A. J. Cavosie, J. W. Valley, S. A. Wilde, "The Oldest Terrestrial Mineral Record": Thirty Years of Research on Hadean Zircon from Jack Hills, Western Australia", en Earth*'s Oldest Rocks*, ed., Londres, 2003. M. J. Van Kranendonk (Nueva York: Elsevier, 2018), 255-78. Los datos más recientes concuerdan con el estudio original descrito en John W. Valley, William H. Peck, Elizabeth M. King y Simon A. Wilde, "A Cool Early Earth", *Geology* 30 (2002): 351-54; John Valley, comunicación personal, 30 de julio de 2019.

16.Werner Heisenberg, *Física y Filosofía: The Revolution in Modern Science* (Londres: Penguin Books, 1958), 16.

17.Max Born, *"Zur Quantenmechanik der Stoßvorgänge", Zeitschrift für Physik* 37, no. 12 (1926): 863. En la versión inicial de este trabajo, Born asoció las funciones de onda cuántica directamente con las probabilidades, pero en una nota de pie de página añadida posteriormente, corrigió la relación para implicar la norma al cuadrado de la función de onda.

18.El principio de exclusión de Wolfgang Pauli, que discutiremos en el capítulo 9, también es esencial para determinar las órbitas cuánticas permitidas de los electrones alrededor de un núcleo. El principio de exclusión establece que no hay dos electrones (más generalmente, no hay dos partículas de materia de la misma especie) que puedan ocupar el mismo estado cuántico. Por consiguiente, los orbitales cuánticos individuales determinados por la ecuación de Schrödinger pueden acomodar cada uno como máximo un electrón (o, incluyendo el grado de libertad del espín, dos electrones). Muchos de estos orbitales tienen la misma energía, lo que en nuestra analogía corresponde a asientos que están situados en el mismo nivel en el teatro cuántico. Pero una vez que cada uno de estos asientos es ocupado -una vez que cada orbital cuántico está ocupado- ese nivel no puede acomodar ningún electrón adicional.

19. Si recuerdas la química de la escuela media, te darás cuenta de que he hecho una modesta simplificación. En una descripción más precisa, señalaría que (debido a la mecánica cuántica) los átomos organizan sus niveles en una variedad de subniveles, cuyos momentos angulares tienen diferentes valores. A veces un nivel más alto, con menos momento angular, tiene menos energía que un nivel más bajo con más momento angular. Si es así, los electrones poblarán ese subnivel del nivel superior antes de completar el nivel inferior.

20.Más precisamente, la estabilidad se logra cuando la subcapa exterior de un átomo (su cáscara de valencia) está llena. Tal vez recuerden la "regla del ocho", que señala que los átomos suelen necesitar ocho electrones en su valva y por lo tanto donarán, recibirán o compartirán electrones con otros átomos para alcanzar ese número.

21.Albert Szent-Györgyi, "Biología y Patología del Agua", Perspectivas *en Biología y Medicina* 14, no. 2 (1971): 239.

22. En este capítulo nos centramos en las plantas y los animales, que están constituidos por células eucariotas (células que contienen un núcleo). Por lo tanto, los investigadores dicen que los linajes

convergen en el "último antepasado común eucarionte", o LECA. En términos más generales, si también consideramos las bacterias y las archaea, los linajes convergen más atrás en el "último ancestro común universal", o LUCA.

23.A. Auton, L. Brooks, R. Durbin y otros, "A global reference for human genetic variation", *Nature* 526, Nº 7571 (octubre de 2015): 68.

24. Los científicos han desarrollado varias medidas para comparar la superposición de ADN entre las especies. Un enfoque compara los pares de bases de los genes que comparten las especies (que es el origen de la diferencia genética de aproximadamente el 1% citada entre los humanos y los chimpancés), mientras que otro compara genomas enteros (lo que da lugar a una diferencia genética entre los humanos y los chimpancés que es algo mayor).

25. Más precisamente, los investigadores describen el código explicado en el siguiente párrafo como "casi" universal, lo que refleja el hecho de que en determinados casos especiales se han descubierto variaciones. No obstante, incluso estas modestas modificaciones comparten todas la misma estructura básica de codificación que la descrita en el capítulo.

26. Con códigos de tres letras y cuatro letras distintas, hay sesenta y cuatro combinaciones posibles. Pero como estas secuencias sólo codifican veinte aminoácidos, varias secuencias diferentes pueden codificar y codifican el mismo aminoácido. Históricamente, entre los primeros trabajos que desentrañaron este código genético se encuentran F. H. C. Crick, Leslie Barnett, S. Brenner y R. J. Watts-Tobin, "General nature of *the genetic code* for proteins", *Nature* 192 (1961): 1227-32; J. Heinrich Matthaei, Oliver W. Jones, Robert G. Martin y Marshall W. Nirenberg, "Characteristics and Composition of Coding Units", Actas de *la Academia Nacional de Ciencias* 48, no. 4 (1962): 666–77. A mediados de la década de 1960, gracias a los esfuerzos de varios investigadores, entre los que destacan Marshall Nirenberg, Robert Holley y Har Gobind Khorana, se completó el código, por lo que estos tres líderes de los esfuerzos fueron galardonados con el Premio Nobel de 1968.

27. La definición precisa de un gen sigue siendo objeto de debate. Además de la información de codificación de la proteína, un gen comprende secuencias auxiliares (que no tienen por qué ser contiguas a la región codificante) que pueden influir en la forma precisa en que una célula utiliza los datos de codificación (por ejemplo, aumentando o suprimiendo la tasa de producción de una proteína determinada, entre otras funcionesreguladoras).

28. La idea clave, las corrientes eléctricas basadas en protones que alimentan la síntesis de ATP, fue propuesta por el bioquímico británico Peter Mitchell, por la que ganó el Premio Nobel en 1978. (P. Mitchell, "Coupling of phosphorylation to electron and hydrogen transfer by a chemiosmotic type of mechanism", *Nature* 191 [1961]: 144-48.) Aunque varios detalles de la propuesta de Mitchell requirieron un refinamiento posterior, el Premio Nobel fue otorgado por sus conocimientos sobre "transferencia de energía biológica". Mitchell era un científico inusual. Harto de las diversas cualidades inane del mundo académico (puedo simpatizar con él), estableció una empresa de caridad independiente, Glynn Research, donde él, varios colegas, y un personal de hasta diez personas llevaron a cabo investigaciones bioquímicas. Los detalles de su fascinante vida se relatan en John Prebble y Bruce Weber, *Vagabundeando en los Jardines de la Mente: Peter Mitchell and the Making of Glynn* (Oxford: Oxford University Press, 2003). Para detalles de la comprensión moderna de la extracción y el transporte de energía dentro de las células, véase, por ejemplo, Bruce Alberts y otros, Molecular *Biology of the Cell*, 5ª ed., Oxford University Press, 2003. (Nueva York: Garland Science, 2007), capítulo 14. El lector informado observará una calificación de la universalidad de este proceso: la extracción de energía mediante la *fermentación* (un proceso de extracción de energía que no utiliza oxígeno).

29.Charles Darwin, *The Origin of Species* (Nueva York: Pocket Books, 2008).

30. En mi analogía me imagino un negocio que itera su producto a través de ensayo y error al azar. Sin embargo, hay otras formas de integrar el ensayo y el error de una manera más efectiva. Por ejemplo, al desarrollar varios algoritmos de cálculo, los informáticos comienzan con un algoritmo, lo modifican al

azar, descartan las modificaciones que disminuyen la velocidad del algoritmo, y luego modifican aún más las que quedan (los algoritmos modificados que aumentan la velocidad). Iterando este procedimiento, tenemos un enfoque inspirado en la selección natural que muestrea un amplio rango de posibilidades, conduciendo hacia procedimientos computacionales más rápidos. Por supuesto, el estudio de los algoritmos modificados en un ordenador es mucho menos costoso que probar un producto modificado al azar en el mercado. Así pues, el ensayo y error a ciegas puede ser una estrategia útil en diversas tareas siempre que el costo en tiempo y recursos para iterar ronda tras ronda de modificación aleatoria sea pequeño (o si las modificaciones pueden probarse de manera masivamenteparalela).

31.Eric T. Parker, Henderson J. Cleaves, Jason P. Dworkin, y otros, "Síntesis primaria de aminas y aminoácidos en un experimento de descarga de chispas rico en H2S de Miller de 1958", Actas de *la Academia Nacional de Ciencias* 108, no. 14 (abril de 2011): 5526.

32. Las paredes celulares pueden formarse naturalmente a partir de sustancias químicas comunes, como los ácidos grasos, que tienen un extremo que busca el agua y otro que la evita. Esta relación con el agua puede hacer que tales moléculas formen barreras de doble ancho, con los extremos amantes del agua de las moléculas en el exterior y los extremos ahorradores de agua que mantienen las dos paredes juntas, una pared celular. Para una discusión en el contexto del escenario del Mundo del ARN, véase G. F. Joyce y J. W. Szostak, "Protocells and RNA Self-Replication", Cold *Spring Harbor Perspectives in Biology* 10, no. 9 (2018).

33.Varios investigadores, entre ellos el químico Svante Arrhenius, el astrónomo Fred Hoyle, el astrobiólogo Chandra Wickramasinghe y el físico Paul Davies, entre otros, han sugerido que algunas de las rocas que cayeron pueden haber llevado en sí mismas semillas de vida particularmente resistentes, moléculas ya preparadas que podrían replicarse y catalizar reacciones. Por muy intrigante que sea esto, planteando la posibilidad de que las rocas espaciales portadoras de vida puedan haber aterrizado en un gran número de planetas a lo largo del cosmos, la propuesta no adelanta nuestra comprensión del origen de la vida, ya que desplaza la cuestión al origen de las semillas.

34.David Deamer, Assembling *Life: How Can Life Begin on Earth and Other Habitable Planets?* (Oxford: Oxford University Press, 2018).

35.A. G. Cairns-Smith, *Seven Clues to the Origin of Life* (Cambridge: Cambridge University Press, 1990).

36. W. Martin y M. J. Russell, "On the origin of biochemistry at an alkaline hydrothermal vent", *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 367 (2007): 1187.

37.Erwin Schrödinger, *¿Qué es la vida?* (Cambridge: Cambridge University Press, 2012), 67.

38. La energía transportada por los fotones entrantes está más concentrada (sus longitudes de onda son más cortas, yacen en la parte visible del espectro, y su número es menor) y es por lo tanto de mayor calidad; la energía transportada por los fotones salientes está más diluida (sus longitudes de onda son más largas, yacen en la parte infrarroja del espectro, y su número es mayor) y es por lo tanto de menor calidad. La utilidad de la energía solar se deriva, pues, no sólo de la voluminosa cantidad de energía suministrada por el sol, sino de que la energía del sol es de alta calidad, con una entropía mucho menor que el calor liberado al espacio por la tierra. Como se ha señalado en el capítulo, por cada fotón que la Tierra recibe del sol, irradia un par de docenas de vuelta al espacio. Para estimar esta cifra, nótese que los fotones del sol se emiten desde un entorno cuya temperatura es de unos 6000 K (la temperatura de la superficie del sol), mientras que los liberados por la tierra se emiten desde un entorno cuya temperatura es de unos 285 K (la temperatura de la superficie de la tierra). La energía de un fotón es proporcional a tales temperaturas (considerando los fotones como un gas ideal de partículas), y por lo tanto la proporción de fotones absorbidos por la tierra desde el sol y luego liberados de nuevo está dada por la proporción de las dos temperaturas, 6000 K/285 K, que es alrededor de 21 fotones, o aproximadamente dos docenas.

39.Erwin Schrödinger, *¿Qué es la vida?* (Cambridge: Cambridge University Press, 2012), 1.

40. Albert Einstein, Notas *autobiográficas* (La Salle, IL: Open Court Publishing, 1979), 3. Para un hermoso tratamiento moderno de los principios termodinámicos en el contexto de los sistemas vivos, proporcionando ejemplos perspicaces que ilustran muchos de los conceptos esenciales que estamos invocando, véase Philip Nelson, Biological *Physics: Energy, Information, Life* (Nueva York: W. H. Freeman and Co., 2014).

41. J. L. England, "Statistical physics of self-replication", *Journal of Chemical Physics* 139 (2013): 121923. 42. Nikolay Perunov, Robert A. Marsland y Jeremy L. England, "Statistical Physics of Adaptation", *Physical Review X* 6 (junio de 2016): 021036-1; Tal Kachman, Jeremy A. Owen y Jeremy L. England, "Self-Organized Resonance During Search of a Diverse Chemical Space", *Physical Review Letters* 119, no. 3 (2017): 038001–1. Véase también G. E. Crooks, "Entropy production fluctuation theorem and the nonequilibrium work relation for free energy differences", Physical *Review E* 60 (1999): 2721; y C. Jarzynski, "Nonequilibrium equality for free energy differences", Physical Review *Letters* 78 (1997): 2690.

42. Inglaterra también señala que, dado que la estructura física de una entidad viviente no sólo está ordenada momentáneamente sino que mantiene su orden durante largos períodos de tiempo, incluso durante un período después de su muerte, una parte importante de los desechos de energía que produce la vida puede ser un subproducto de la construcción de esas estructuras estables. Para la vida, entonces, puede ser que una contribución dominante a los dos pasos entrópicos esté ligada a la formación de la estructura además de la preservación continua de la homeostasis. Obsérvese también que, si bien los sistemas vivos necesitan tomar energía de alta calidad, necesitan que esa energía esté en una forma que no perturbe la organización interna del sistema. Para una ilustración mecánica, una copa de vino puede ser impulsada a vibrar por un tono que tiene la frecuencia correcta, pero si se transfiere demasiada energía, la copa puede romperse. Para evitar un resultado análogo, algunos grados de libertad en un sistema disipativo pueden agruparse en configuraciones que eviten la resonancia con la energía que incide en el entorno. La vida implica un equilibrio apropiado entre estos extremos.

Capítulo 5: Partículas y conciencia

1. Albert Camus, *El mito de Sísifo,* trans. Justin O'Brien (Londres: Hamish Hamilton, 1955), 18.

2. Ambrose Bierce, *The Devil's Dictionary* (Mount Vernon, NY: The Peter Pauper Press, 1958), 14.

3. Will Durant, *The Life of Greece, vol*. 2 de *The Story of Civilization* (Nueva York: Simon & Schuster, 2011), 8181-82, Kindle.

4. Como menciono frecuentemente las ecuaciones matemáticas que articulan las leyes de la física, vale la pena escribir brevemente nuestra versión más refinada de estas ecuaciones. Incluso si no captas los símbolos, puede ser interesante ver el "aspecto" general de las matemáticas.

Las ecuaciones de campo de Einstein de la teoría general de la relatividad son: $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$, donde el lado izquierdo describe la curvatura del espacio tiempo, así como la constante cosmológica, Λ, y el lado derecho describe la masa y la energía que es la fuente de la curvatura (la fuente del campo gravitatorio). En esta expresión (y en las que siguen) los índices griegos van de 0 a 3, representando las cuatro coordenadas del espacio tiempo.

Las ecuaciones de Maxwell del electromagnetismo son $\partial_\alpha F^{\alpha\beta} = \mu_0 J^\beta$ y $\partial_{[\alpha}F_{\rho\sigma]} = 0$, donde el lado izquierdo de estas ecuaciones describe los campos eléctricos y magnéticos, y el lado derecho de la primera ecuación describe las cargas eléctricas que dan lugar a estos campos.

Las ecuaciones para las fuerzas nucleares fuertes y débiles son generalizaciones de las ecuaciones de Maxwell. La novedad esencial es que mientras que en la teoría de Maxwell podemos escribir la "fuerza de campo" $F_{\alpha\beta} = \partial_\alpha A_\beta - \partial_\beta A_\alpha$ en términos de A_α, lo que se conoce como el "potencial vectorial", para las fuerzas

nucleares hay una colección de fuerzas de campo $F_{a\alpha\beta}$ así como una colección de potenciales vectoriales $A_{a\alpha}$, que están relacionados por $F_{a\alpha\beta} = \partial_\alpha A_{a\beta} - \partial_\beta A_{a\alpha} + g f_{abc} A_{b\alpha} A_{c\beta}$. Los índices latinos corren sobre los generadores de las álgebras Lie su(2) para la fuerza nuclear débil y la su(3) para la fuerza nuclear fuerte, y f_{abc} son las constantes de estructura de estas álgebras.

La ecuación de Schrödinger de la mecánica cuántica es $i\hbar \frac{\partial\psi}{\partial\tau} = H\psi$, donde H es el Hamiltoniano y ψ es la función de onda, cuya norma (debidamente normalizada) al cuadrado proporciona probabilidades de mecánica cuántica. La fusión de la mecánica cuántica y las fuerzas electromagnéticas, nucleares débiles y fuertes, incluyendo también las conocidas partículas de materia y la partícula Higgs, constituye el Modelo Estándar de la Física de Partículas. Típicamente, el Modelo Estándar se expresa en un formalismo equivalente pero distinto, conocido como el camino integral (un enfoque del que fue pionero el físico Richard Feynman). La fusión de la mecánica cuántica y la relatividad general es un tema de investigación avanzada.

5. Augustine, Confesiones, trans. F. J. Sheed (Indianápolis, IN: Hackett Publishing, 2006), 197.

6. Tomás de Aquino, *Questions Disputatae de Veritate*, preguntas 10-20, trans. James V. McGlynn, S.J. (Chicago: Compañía Henry Regnery, 1953).

7. William Shakespeare, *Medida por medida,* ed. J. M. Nosworthy (Londres: Penguin Books, 1995), 84.

8. Gottfried Leibniz, carta a Christian Goldbach, 17 de abril de 1712.

9. Otto Loewi, "An Autobiographical Sketch", Perspectives *in Biology and Medicine* 4, no. 1 (Otoño 1960): 3-25. Loewi señaló incorrectamente que el sueño tuvo lugar el domingo de Pascua de 1920, aunque el año era 1921.

10. Para una historia más profunda, ver Henri Ellenberger, *The Discovery of the Unconscious* (New York: Basic Books, 1970).

11. Peter Halligan y John Marshall, "Blindsight and insight in visuo-spatial neglect", *Nature* 336, no. 6201 (22-29 de diciembre de 1988): 766-67.

12. El culpable fue James Vicary, quien en 1957 afirmó que los destellos subliminales que animaban al público a comer palomitas de maíz y a beber Coca-Cola se traducían en importantes aumentos de las ventas en ambos. Más tarde, Vicary admitió que las afirmaciones no tenían fundamento

13. Los investigadores han establecido la capacidad de una amplia variedad de estímulos subliminales para influir en las actividades conscientes. En este párrafo describo un ejemplo, las influencias subliminales en las determinaciones numéricas simples. Pero se han demostrado influencias subliminales similares para el reconocimiento de palabras -véase, por ejemplo, Anthony J. Marcel, "Percepción consciente e inconsciente": Experiments on Visual Masking and Word Recognition", *Cognitive Psychology* 15 (1983): 197-237- así como para la percepción y evaluación de un amplio espectro de imágenes y objetos.

14. L. Naccache y S. Dehaene, "El método de preparación": Imaging Unconscious Repetition Priming Reveals an Abstract Representation of Number in the Parietal Lobes", *Cerebral Cortex* 11, no. 10 (2001): 966-74; L. Naccache y S. Dehaene, "Unconscious Semantic Priming Extends to Novel Unseen Stimuli", *Cognition* 80, no. 3 (2001): 215–29. Obsérvese que en estos experimentos, el estímulo inicial se hace subliminal mediante un procedimiento de *enmascaramiento en* el que se destellan formas geométricas antes y después del estímulo. Para una revisión, ver Stanislas Dehaene y Jean-Pierre Changeux, "Experimental and Theoretical Approaches to Conscious Processing", *Neuron* 70, no. 2 (2011): 200-27, y Stanislas Dehaene, *Consciousness and the Brain* (New York: Penguin Books, 2014).

15. Isaac Newton, carta a Henry Oldenburg, 6 de febrero de 1671. http://www.newtonproject.ox.ac.uk/view/texts/normalized/NATP00003.

16. Filósofos, psicólogos, místicos y otros pensadores han adoptado varias definiciones de la conciencia. Dependiendo del contexto, algunas pueden ser más útiles que el enfoque que estamos tomando, otras menos. Nos centramos aquí en el "problema difícil", y para este propósito la descripción dada en el capítulo nos servirá bien.

17. Mi referencia aquí a los protones, neutrones y electrones es una abreviación del estado de mi cerebro articulado en términos de los ingredientes más refinados de la naturaleza, cualquiera que sean esos ingredientes (partículas, campos, cuerdas, etc.).

18. Thomas Nagel, "¿Cómo es ser un murciélago?" Revista *filosófica* 83, no. 4 (1974): 435–50.

19. Cuando hablo de entender los tifones o los volcanes - o cualquier cuerpo macroscópico - en términos de partículas fundamentales, estoy hablando desde una perspectiva "en principio". Como la teoría del caos ha subrayado durante mucho tiempo, las pequeñas diferencias en las condiciones iniciales de un conjunto de partículas darán lugar a enormes diferencias en la futura configuración de las partículas. Esto es cierto incluso para pequeñas colecciones. En la práctica, este hecho influye significativamente en el tipo de predicciones que podemos hacer, pero no entraña ningún misterio. La teoría del caos proporciona un conjunto significativo y profundo de conocimientos, pero la teoría no fue desarrollada para llenar un vacío percibido en nuestra comprensión de las leyes físicas subyacentes. Sin embargo, en lo que respecta a la conciencia, el problema planteado en el capítulo -cómo pueden las partículas sin mente producir sensaciones conscientes- ha sugerido a algunos investigadores que existe una laguna de naturaleza mucho más fundamental. Han argumentado que las sensaciones de la mente no pueden surgir de grandes colecciones de partículas, independientemente de los movimientos coordinados que esas partículas puedan seguir.

20. Frank Jackson, "Epiphenomenal Qualia", *Philosophical Quarterly* 32 (1982): 127-36.

21. Daniel Dennett, *Consciousness Explained* (Boston: Little, Brown and Co., 1991), 399-401.

22. David Lewis, "Lo que la experiencia enseña", Actas de *la Sociedad Rusa* 13 (1988): 29-57. Reimpreso en David Lewis, *Papers in Metaphysics and Epistemology* (Cambridge: Cambridge University Press, 1999): 262-90, que se basa en las ideas anteriores de Laurence Nemirow, "Review of Nagel's Mortal Questions", *Philosophical Review* 89 (1980): 473-77.

23. Laurence Nemirow, "Physicalism and the cognitive role of acquaintance", en *Mind and Cognition*, ed. W. Lycan (Oxford: Blackwell, 1990), 490-99.

24. Frank Jackson, "Postscript on Qualia", en *Mind, Method, and Conditionals, Selected Essays* (Londres: Routledge, 1998), 76-79.

25. En su trabajo de 1995, Chalmers discute tanto el vitalismo como el electromagnetismo como referencias útiles para pensar en el difícil problema. El rasgo distintivo clave del problema difícil, tal como lo ha definido Chalmers, es que aborda necesariamente cualidades subjetivas de la experiencia y, por lo tanto, sostiene, no puede resolverse adquiriendo una comprensión más refinada de las funciones objetivas del cerebro. En esta sección, me parece útil enmarcar el problema de manera algo diferente, contrastando las cuestiones abiertas que la ciencia puede resolver, al menos en principio, utilizando su paradigma actualmente establecido (que define el ámbito en el que la realidad, tal como la conocemos, tiene lugar) y las cuestiones abiertas para las que este paradigma puede resultar inadecuado. En este encuadre, un problema es difícil si para resolverlo debemos cambiar fundamentalmente el enfoque existente para describir el mundo (en el ejemplo de la electricidad y el magnetismo, los científicos tuvieron que introducir cualidades fundamentalmente nuevas: campos eléctricos que llenan el espacio, campos magnéticos y cargas eléctricas). En ese Chalmers argumenta que el difícil problema no puede ser resuelto utilizando únicamente los ingredientes materiales que están en el centro de nuestras descripciones físicas fundamentales de la realidad, el encuadre que introduzco, aunque diferente, capta una parte esencial del problema. Obsérvese también que, según Chalmers, la razón misma por la que el vitalismo desapareció gradualmente es que la cuestión que destacaba *era* una de función objetiva: ¿Cómo pueden los ingredientes físicos llevar a cabo las funciones objetivas de la vida? A medida que la ciencia comprendió mejor las capacidades funcionales de los ingredientes físicos (moléculas bioquímicas y demás), el enigma que el vitalismo trató de abordar disminuyó. Según Chalmers, esta progresión no se recapitulará con el duro problema. Los físicos no comparten esta intuición y por lo tanto anticipan el progreso en la comprensión de la función cerebral dando una visión de la experiencia subjetiva. Para más detalles, ver David Chalmers, "Facing Up to the Problem of Consciousness",

Journal of Consciousness Studies 2, no. 3 (1995): 200-19, y David Chalmers, *The Conscious Mind: In Search of a Fundamental Theory* (Oxford: Oxford University Press, 1997), 125.

26. Hay innumerables casos en la literatura clínica en los que la extirpación de secciones específicas del cerebro da lugar a la pérdida de funciones cerebrales específicas. Uno de esos casos se da especialmente cerca de casa. Después de una cirugía cerebral para extirpar un tumor maligno, mi esposa, Tracy, perdió temporalmente la capacidad de nombrar una amplia variedad de sustantivos comunes. Tal como ella lo describe, fue como si la cirugía hubiera cortado el banco de datos en el que se almacenaban sus conocimientos sobre los nombres de varios artículos. Todavía podía evocar una imagen mental de tales sustantivos, como un par de zapatos rojos, pero era incapaz de nombrar la imagen en su mente.

27. Giulio Tononi, *Phi: A Voyage from the Brain to the Soul* (Nueva York: Panteón, 2012); Christof Koch, Consciousness*: Confessions of a Romantic Reductionist* (Cambridge, MA: MIT Press, 2012); Masafumi Oizumi, Larissa Albantakis, y Giulio Tononi, "From the Phenomenology to the Mechanisms of Consciousness: Teoría de la Información Integrada 3.0", *PLoS Computational Biology* 10, no. 5 (mayo de 2014).

28. Scott Aaronson, "Why I Am Not an Integrated Information Theorist (or, The Unconscious Expander)", *Shtetl-Optimized.* https://www.scottaaronson.com/blog/?p=1799.

29. Michael Graziano, *Consciousness and the Social Brain* (Nueva York: Oxford University Press, 2013); Taylor Webb y Michael Graziano, "The attention schema theory: Un relato mecanicista de la conciencia subjetiva", Fronteras de la *Psicología* 6 (2015): 500.

30. La percepción humana del color es más compleja de lo que sugiere mi breve descripción. Nuestros ojos tienen receptores cuya sensibilidad varía en un rango de frecuencias de luz. Algunos son más sensibles a las frecuencias visibles más altas, otros a las más bajas, y otros a las frecuencias que se encuentran entre las dos. Los colores que nuestros cerebros perciben surgen de una mezcla de las respuestas de los diversos receptores.

31. Al igual que en la nota final anterior, se trata de una simplificación, ya que "rojo" es la interpretación del cerebro de una unión mixta de respuestas a diversas frecuencias recibidas por sus receptores visuales. Sin embargo, la descripción simplificada comunica el punto esencial: nuestra sensación de color es una representación útil pero tosca de los datos físicos que llegan a nuestros ojos a través de las ondas electromagnéticas.

32. David Premack y Guy Woodruff, "¿Tiene el chimpancé una teoría de la mente?" *Cognición y conciencia en especies no humanas*, número especial de Ciencias del Comportamiento *y del Cerebro* 1, no. 4 (1978): 515–26.

33. Daniel Dennett, *The Intentional Stance* (Cambridge, MA: MIT Press, 1989).

34. Véase, por ejemplo, el modelo de borradores múltiples de Dennett en Daniel Dennett, *Consciousness Explained* (Boston: Little, Brown & Co., 1991), la teoría del espacio de trabajo global de Baar en Bernard J. Baars, In *the Theater of Consciousness (*Nueva York: Oxford University Press, 1997), y la teoría de la reducción orquestada de Hameroff y Penrose en Stuart Hameroff y Roger Penrose, "Consciousness in *the universe":* Una revisión de la teoría 'Orch OR'". *Physics of Life Reviews* 11 (2014): 39-78.

35. Si bien toda la mecánica cuántica se remonta a la ecuación de Schrödinger, en los decenios transcurridos desde que se introdujo la teoría, muchos físicos han desarrollado mucho más el formalismo matemático. La predicción exitosa a la que me refiero surge de los cálculos en un campo de la mecánica cuántica conocido como electrodinámica cuántica, que fusiona la mecánica cuántica con la teoría del electromagnetismo de Maxwell.

36.Una forma alternativa de expresarlo es que según la mecánica cuántica el electrón, antes de ser medido, no tiene una posición en el sentido convencional del término.

37. Como se señala en la nota 5 del capítulo 3, existe una versión de la mecánica cuántica en la que las partículas retienen trayectorias nítidas y definidas, ofreciendo así una posible resolución del problema de la medición cuántica. Hasta la fecha, este enfoque, denominado mecánica de Bohmian o mecánica de Broglie-Bohm, es aplicado por un pequeño grupo de investigadores en todo el mundo. Aunque es un candidato a caballo oscuro, no descartaría la mecánica de Bohmie como un enfoque que podría convertirse en una perspectiva dominante en el futuro. Otro enfoque del problema de la medición cuántica es la interpretación de Muchos Mundos, en la que todos los resultados potenciales permitidos por la evolución de la mecánica cuántica se realizan a partir de la medición. Y una tercera propuesta es la teoría de Ghirardi-Rimini-Weber (GRW), que introduce un nuevo y fundamental proceso físico que rara vez pero aleatoriamente colapsa la onda de probabilidad de una partícula individual. En el caso de pequeñas colecciones de partículas, el proceso ocurre con muy poca frecuencia como para afectar los resultados de experimentos cuánticos exitosos. Pero para grandes colecciones de partículas, el proceso ocurre mucho más rápidamente, creando un efecto dominó que selecciona precisamente un resultado a realizar en el macromundo. Para más detalles, ver, por ejemplo, *La Tela del Cosmos*, capítulo 7.

38.38. Fritz London y Edmond Bauer, *The Theory of Observation in Quantum Mechanics, Nº* 775 *de Actualités scientifiques et industrielles; Exposés de physique générale, editado por Paul Langevin* (París: Hermann, 1939), traducido *por* John Archibald Wheeler y Wojciech Zurek, *Quantum Theory and Measurement* (Princeton: Princeton University Press, 1983), 220.

39.Eugene Wigner, *Symmetries and Reflections* (Cambridge, MA: MIT Press, 1970).

40. Aristóteles describió una acción como "voluntaria" si la acción se inició dentro de un agente determinado y surgió de las propias deliberaciones de ese agente, perspectiva que, con refinamientos sustanciales, ha tenido una influencia significativa. Véase Aristóteles, *Ética Nicomacheana*, trans. C. D. C. Reeve (Indianápolis, IN: Hackett Publishing, 2014), 35-41. Aristóteles no incluyó las leyes deterministas de la física entre las fuerzas externas con capacidad para hacer involuntaria una acción, pero aquellos (incluyéndome a mí) que sí consideran esas influencias fundamentales aunque impersonales, encuentran que su noción de "voluntario" no se ajusta a su intuición respecto del libre albedrío.

41.Como en la nota 17 de este capítulo, cuando me refiero a las partículas que constituyen un objeto macroscópico que es una abreviatura del estado físico completo del objeto. Clásicamente, este estado es proporcionado por las posiciones y velocidades de los constituyentes fundamentales del objeto. Mecánicamente cuántica, el estado es proporcionado por la función de onda que describe los constituyentes del objeto. Ahora, mi énfasis en las partículas podría dejarlos con la duda sobre los campos. Como el lector técnicamente entrenado puede saber, en la teoría de campos cuánticos aprendemos que la influencia de un campo es transmitida por partículas (por ejemplo, la influencia del campo electromagnético es transmitida por fotones); además, la teoría de campos cuánticos también muestra que un campo macroscópico puede ser descrito matemáticamente como una configuración particular de partículas - el llamado *estado coherente* de las partículas. Por lo tanto, mi referencia a las "partículas" tiene por objeto subsumir los campos también. El lector informado también observará que ciertas características cuánticas, como el entrelazamiento cuántico, pueden hacer que el estado de un objeto sea una noción más sutil en el cuántico, en contraposición al entorno clásico. Para gran parte de lo que vamos a discutir, podemos ignorar tales sutilezas; la progresión legal y unitaria del mundo físico es, fundamentalmente, todo lo que necesitaremos.

42.Más precisamente, la probabilidad de que las partículas de la roca conspiren para empujarme del banco es tan ridículamente pequeña que en las escalas de tiempo de interés la posibilidad estadística de que la roca me salve puede ser ignorada.

43.La literatura filosófica contiene muchas propuestas de compatibilidad. De ellas, el enfoque que describo es el más cercano al propuesto y desarrollado por Daniel Dennett en *Freedom Evolves* (Nueva York: Penguin Books, 2003) y también en *Elbow Room* (Cambridge, MA: MIT Press, 1984), a la que remito al lector para una discusión más profunda. He estado rumiando sobre estas ideas desde que Luise

Vosgerchian, una de mis profesoras más influyentes, me incitó a pensar en ellas hace décadas. Vosgerchian, que era profesora de música en Harvard, tenía un profundo interés en cómo los descubrimientos científicos se relacionan con las sensibilidades estéticas, y me pidió que escribiera sobre la libertad y la creatividad humanas desde el punto de vista de la física moderna.

9. La inteligencia artificial y el aprendizaje de la máquina hacen que el punto sea aún más fuerte. Los investigadores han desarrollado algoritmos para jugar a juegos como el ajedrez o el Go que pueden actualizarse basándose en el análisis del éxito o el fracaso de las jugadas anteriores. Dentro de la computadora que alberga tal algoritmo, todo lo que tenemos son partículas que se mueven de esta manera y de aquella bajo el control total de la ley física. Y aún así el algoritmo mejora. El algoritmo aprende. Los movimientos del algoritmo se vuelven creativos. Tan creativos, de hecho, que con sólo horas de tal actualización interna, los sistemas más refinados pueden avanzar desde jugar al nivel de un principiante hasta triunfar sobre los maestros de clase mundial. Ver David Silver, Thomas Hubert, Julian Schrittwieser, y otros, "Un algoritmo de aprendizaje de refuerzo general que domina el ajedrez, el shogi, y el Go through self-play", *Science* 362 (2018): 1140-44.

10. El asunto aquí es que si "yo" soy mi configuración de partículas, cuando esa configuración cambia, tanto en la disposición como en la composición, ¿sigo siendo yo? Es una versión de otra de las preguntas de la filosofía, la identidad personal a través del tiempo, y así ha generado una amplia gama de puntos de vista y respuestas. Soy parcial al enfoque de Robert Nozick en el que, para utilizar un lenguaje algo técnico, identificamos mi yo futuro minimizando una función de distancia sobre el espacio de los candidatos a ese papel, buscando a la persona que "más de cerca continúa" la existencia que he tenido hasta este momento. Especificar la función de distancia es, por supuesto, esencial, y Nozick señala que las personas que tienen diferentes énfasisen los aspectos definitorios de la personalidad pueden hacer diferentes elecciones. En muchos casos, la noción intuitiva de quién "continúa más de cerca" es adecuada, pero se pueden construir ejemplos artificiales pero desconcertantes. Por ejemplo, imaginemos una avería en un transportador que produce dos copias idénticas de mí en un destino determinado. ¿Qué colección de partículas soy "realmente" yo? En este caso, Nozick sugiere que sin un único continuador más cercano yo podría no existir. Sin embargo, como me siento cómodo con las minimizaciones no únicas de las funciones de distancia, mi perspectiva es que ambas copias serían yo. Para la noción de "yo" utilizada en el capítulo, la noción intuitiva de la identidad personal se alinea con la noción de Nozick, ya que las diversas colecciones de partículas que intuitivamente etiquetaríamos, digamos, "Brian Greene" a lo largo de mi vida son, de hecho, continuadores más cercanos. Véase Robert Nozick, *Philosophical Explanations* (Cambridge, MA: Belknap Press, 1983), 29-70.

11. Una cuestión que plantea esta discusión es si debes soportar las consecuencias de un comportamiento que tus conciudadanos o la sociedad consideren inaceptable. Los filósofos han debatido durante mucho tiempo cuestiones en la intersección del libre albedrío, la responsabilidad moral y el papel del castigo. Los temas son complejos y espinosos. En pocas palabras, esta es mi opinión: Por las mismas razones dadas en el capítulo, sus acciones, buenas o malas, son su responsabilidad, incluso en ausencia de libre albedrío. Ustedes son sus partículas, y si sus partículas hacen algo malo, han hecho algo malo. La verdadera cuestión, entonces, es ¿cuáles deberían ser las consecuencias? Dejando de lado el hecho de que las consecuencias de las acciones tampoco son de libre albedrío, la pregunta es si deberías sufrir un castigo. La única respuesta que encuentro coherente, o, en realidad, el único comienzo de una respuesta que encuentro coherente, es que el castigo debe basarse en su capacidad de proteger los intereses de la sociedad, incluyendo la disuasión de futuros casos de comportamiento inaceptable. De nuevo, el libre albedrío es compatible con el aprendizaje; el Roomba aprende, al igual que la gente. Las experiencias de hoy están causalmente relacionadas con las acciones de mañana. Así que si el castigo impide o disuade a usted y/o a otros de emprender posteriormente acciones inaceptables, entonces a través del castigo hemos guiado a la sociedad hacia un resultado más satisfactorio. Consideraciones similares son relevantes para los "casos de prueba" a menudo planteados en estas discusiones en las que los comportamientos inaceptables se deben a circunstancias atenuantes (tumores cerebrales, coacción, esquizofrenia, implantes neuronales controlados por alienígenas nefastos, etc.) que parecerían liberar al perpetrador de su responsabilidad. La opinión que se desprende de lo anterior y del análisis del capítulo es que esos individuos *son* responsables de sus actos. Sus partículas *hicieron cosas* inaceptables. Y son sus partículas. Sin embargo, con sujeción a los detalles precisos en cualquier situación dada, debido a las circunstancias atenuantes puede no haber oportunidad de castigo para tener cualquier

beneficio. Si su comportamiento inaceptable se debió a un tumor cerebral, castigarlo probablemente no tendrá ningún papel en la disuasión de un comportamiento similar causado por circunstancias similares en el futuro. Y si podemos remover el tumor, ya no representas ninguna amenaza, así que el castigo no ofrecerá a la sociedad ninguna protección adicional. En pocas palabras, el castigo debe servir un propósito pragmático.

Capítulo 6: Lenguaje e historia

1. Alice Calaprice, ed., *The New Quotable Einstein* (Princeton: Princeton University Press, 2005), 149.

2. Max Wertheimer, Pensamiento *Productivo,* ampliado. (Nueva York: Harper y Hermanos, 1959), 228.

3. Ludwig Wittgenstein, *Tractatus Logico-Philosophicus* (Nueva York: Harcourt, Brace & Company, 1922), 149.

4. Toni Morrison, conferencia del Premio Nobel, 7 de diciembre de 1993. https://www.nobelprize.org/prizes/literature/1993/ morrison/lecture/.

5. Como escribió Darwin, "El hombre primitivo, o más bien algún progenitor temprano del hombre, probablemente usó por primera vez su voz para producir verdaderas cadencias musicales, es decir, en el canto" y añadió "Este poder se habría ejercido especialmente durante el cortejo de los sexos, - habría expresado varias emociones, como el amor, los celos, el triunfo- y habría servido como un desafío a los rivales". Charles Darwin, *The Descent of Man* (Nueva York: D. Appleton y Compañía, 1871), 56.

6. En la edición de abril de 1869 de la Revista *Trimestral,* Wallace, en referencia a las fuerzas que impulsan la evolución - "las leyes de variación, multiplicación y supervivencia" - argumentó que, como se señala en el capítulo, "debemos por lo tanto admitir la posibilidad, de que en el desarrollo de la raza humana, una Inteligencia Superior ha guiado las mismas leyes para fines más nobles". Alfred Russel Wallace, "Sir Charles Lyell sobre los climas geológicos y el origen de las especies", *Quarterly Review* 126 (1869): 359-94.

7. Joel S. Schwartz, "Darwin, Wallace y el *descenso del hombre*", *Journal of the History of Biology* 17, no. 2 (1984): 271-89.

8. Charles Darwin, carta a Alfred Russel Wallace, 27 de marzo de 1869. https://www.darwinproject.ac.uk/letter/ ?docId=cartas/DCP-LETT-6684.xml;query=niño;brand=defecto.

9. Dorothy L. Cheney y Robert M. Seyfarth, *How Monkeys See the World: Inside the Mind of Another Species* (Chicago: University of Chicago Press, 1992). Una grabación de estas llamadas de alarma puede escucharse en la página web de la BBC: https://www.bbc.co.uk/sounds/play/p016dgw1.

10. Bertrand Russell, *Human Knowledge* (Nueva York: Routledge, 2009), 57-58.

11. R. Berwick y N. Chomsky, *¿Por qué sólo nosotros?* (Cambridge, MA: MIT Press, 2015). Aunque algunos han cuestionado si la necesidad de la propuesta de un cambio biológico comparativamente rápido crea tensión con la comprensión de la evolución, Chomsky ha argumentado que encaja perfectamente en la perspectiva neo-darwiniana moderna que abarca episodios biológicos, como la formación del ojo, que se desvían de la visión tradicional de que todas las cosas la evolución son lentas y graduales.

12. S. Pinker y P. Bloom, "Lenguaje natural y selección natural", *Ciencias del Comportamiento y del Cerebro* 13, no. 4 (1990): 707-84; Steven Pinker, *The Language Instinct* (New York: W. Morrow and Co., 1994); Steven Pinker, "Language as an adaptation to the cognitive niche", en *Language Evolution: States of the Art,* ed. S. Kirby y M. Christiansen (Nueva York: Oxford University Press, 2003), 16-37.

13. Por ejemplo, como el lingüista y psicólogo del desarrollo Michael Tomasello ha señalado, "Por supuesto, todas las lenguas del mundo tienen cosas en común... Pero estos puntos comunes no provienen de ninguna gramática universal, sino más bien de aspectos universales de la cognición humana, la interacción social y el procesamiento de la información, la mayoría de los cuales existían en los seres humanos antes de que surgiera algo parecido a las lenguas modernas". Michael Tomasello, "La gramática universal está muerta", *Ciencias del Comportamiento y del Cerebro* 32, no. 5 (octubre de 2009): 470-71.

14. Simon E. Fisher, Faraneh Vargha-Khadem, Kate E. Watkins, Anthony P. Monaco y Marcus E. Pembrey, "Localización de un gen implicado en un grave trastorno del habla y el lenguaje", *Nature Genetics* 18 (1998): 168-70. C. S. L. Lai y otros, "A novel forkhead-domain gene is mutate in a severe speech and language disorder", *Nature* 413 (2001): 519-23.

15. Johannes Krause, Carles Lalueza-Fox, Ludovic Orlando, y otros, "The Derived FOXP2 Variant of Modern Humans Was Shared with Neandertals", *Current Biology* 17 (2007): 1908-12.

16. Fernando L. Mendez y otros. "La divergencia de los cromosomas Y humanos neandertales y modernos". *American Journal of Human Genetics* 98, no. 4 (2016): 728–34.

17. Guy Deutscher, *The Unfolding of Language: Una gira evolutiva del mayor invento de la humanidad* (Nueva York: Henry Holt y Compañía, 2005), 15.

18. Dean Falk, "Evolución prelingüística en los primeros homínidos: ¿De dónde son las madres?" *Behavioral and Brain Sciences* 27 (2004): 491-541; Dean Falk, *Finding Our Tongues: Mothers, Infants and the Origins of Language* (Nueva York: Basic Books, 2009).

19. R. I. M. Dunbar, "Gossip in Evolutionary Perspective", *Review of General Psychology* 8, no. 2 (2004): 100-10; Robin Dunbar, *Grooming, Gossip, and the Evolution of Language* (Cambridge, MA: Harvard University Press, 1997).

20. N. Emler, "La verdad sobre el chisme", *Boletín de la Sección de Psicología Social* 27 (1992): 23-37; R. I. M. Dunbar, N. D. C. Duncan, y A. Marriott, "Comportamiento de la conversación humana", *Human Nature* 8, no. 3 (1997): 231–46.

21. Daniel Dor, *The Instruction of Imagination* (Oxford: Oxford University Press, 2015).

22. Para el papel de hacer fuego y cocinar, véase Richard Wrangha, *Catching Fire: How Cooking Made Us Human* (New York: Basic Books; 2009); para la crianza en grupo de los jóvenes, véase Sarah Hrdy, *Mothers and Others: The Evolutionary Origins of Mutual Understanding* (Cambridge, MA: Belknap Press, 2009); para el aprendizaje y la cooperación, véase Kim Sterelny, *The Evolved Apprentice: How Evolution Made Humans Unique (Cambridge*, MA: MIT Press, 2012).

23. R. Berwick y N. Chomsky, *¿Por qué sólo nosotros?* (Cambridge, MA: MIT Press, 2015), capítulo 2.

24. David Damrosch, *El Libro Enterrado: La pérdida y el redescubrimiento de la gran epopeya de Gilgamesh* (Nueva York: Henry Holt and Company, 2007).

25. Andrew George, trans., *La épica de Gilgamesh: The Babylonian Epic Poem and Other Texts in Akkadian and Sumerian* (Londres: Penguin Classics, 2003).

26. Para una introducción a la perspectiva y los principios de la psicología evolutiva, véase John Tooby y Leda Cosmides, "The Psychological Foundations of Culture", en *The Adapted Mind: Psicología evolutiva y la generación de la cultura*, ed. Jerome H. Barkow, Leda Cosmides, y John Tooby (Oxford: Oxford University Press, 1992), 19-136; David Buss, *Evolutionary Psychology: The New Science of the Mind* (Boston: Allyn & Bacon, 2012).

27. S. J. Gould y R. C. Lewontin, "Las enjutas de San Marco y el paradigma panglossiano": A Critique of the Adaptationist Programme", *Actas de la Royal Society B* 205, nº 1161 (21 de septiembre de 1979): 581-98.

28. Steven Pinker, *How the Mind Works* (Nueva York: W. W. Norton, 1997), 530; Brian Boyd, *On the Origin of Stories* (Cambridge, MA: Belknap Press, 2010); Brian Boyd, "The evolution of stories: from mimesis to language, from fact to fiction", *WIREs Cognitive Science* 9 (2018): e1444.

29. Patrick Colm Hogan, *The Mind and Its Stories* (Cambridge: Cambridge University Press, 2003); Lisa Zunshine, *Why We Read Fiction: Theory of Mind and the Novel* (Columbus: Ohio State University Press, 2006).

30. Jonathan Gottschall, *The Storytelling Animal* (Boston y Nueva York: Mariner Books, Houghton Mifflin Harcourt, 2013), 63.

31. Keith Oatley, "Why fiction may be twice as true as fact", *Review of General Psychology* 3 (1999): 101-17.

32. Para relatos absorbentes de la obra de Jouvet, véase Barbara E. Jones, "Los misterios del sueño y la vigilia desvelados por Michel Jouvet", *Sleep Medicine* 49 (2018): 14-19; Isabelle Arnulf, Colette Buda, y

Jean-Pierre Sastre, "Michel Jouvet: Un explorador de sueños y un gran narrador", *Medicina del Sueño* 49 (2018): 4-9.

33. Kenway Louie y Matthew A. Wilson, "Temporally Structured Replay of Awake Hippocampal Ensemble Activity During Rapid Eye Movement Sleep", *Neuron* 29 (2001): 145-56.

34. Las extravagantes narraciones que a menudo asociamos con los sueños -violando la ley física, la progresión lógica y la coherencia interna- podrían sugerir que el acto de soñar tiene poca relevancia para los encuentros del mundo real. Sin embargo, la prevalencia de tales sueños extraños puede ser mucho menor de lo que nuestras evaluaciones anecdóticas sugieren. En cambio, una fracción significativa de nuestros sueños puede tener un contenido realista. Antti Revonsuo, Jarno Tuominen y Katja Valli, "Los Avatares *en* la máquina de soñar como una simulación de la realidad social", *Open MIND* (2015): 1-28; Serena Scarpelli, Chiara Bartolacci, Aurora D'Atri, y otros, "El papel funcional del sueño en los procesos emocionales", *Fronteras de la Psicología* 10 (Marzo 2019): 459.

35. Alfred North Whitehead, *Science and the Modern World* (New York: Free Press, 1953), 10.

36. Joyce Carol Oates, "Literatura como Placer, Placer como Literatura", *Narrativa.* https://www.narrativemagazine.com/issues/stories-week-2015-2016/story-week/literature-pleasure-pleasure-literature-joyce-carol-oates.

37. Jerome Bruner, "La construcción narrativa de la realidad", *Critical Inquiry* 18, no. 1 (otoño 1991): 1-21.

38. Jerome Bruner, *Haciendo Historias: Law, Literature, Life* (Nueva York: Farrar, Straus y Giroux, 2002), 16.

39. Brian Boyd, "La evolución de las historias: de la mímesis al lenguaje, de la realidad a la ficción", *WIRES Cognitive Science* 9 (2018): 7-8, e1444.

40. John Tooby y Leda Cosmides, "¿La belleza construye mentes adaptadas? Hacia una teoría evolutiva de la estética, la ficción y las artes", *Subtítulo* 30, no. 1/2, número 94/95 (2001): 6-27.

41. Ernest Becker, *La negación de la muerte* (Nueva York: Free Press, 1973), 97.

42. Joseph Campbell, *El héroe de las mil caras* (Novato, CA: New World Library, 2008), 23.

43. Michael Witzel, *The Origins of the World's Mythologies* (New York: Oxford University Press, 2012).

44. Karen Armstrong, *A Short History of Myth* (Melbourne: The Text Publishing Company, 2005), 3.

45. Marguerite Yourcenar, *Cuentos Orientales* (Nueva York: Farrar, Straus y Giroux, 1985).

46. Scott Leonard y Michael McClure, *Myth and Knowing* (Nueva York: McGraw-Hill Higher Education, 2004), 283-301.

47. Michael Witzel, *The Origins of the World's Mythologies* (New York: Oxford University Press, 2012), 79.

48. Dan Sperber, *Rethinking Symbolism* (Cambridge: Cambridge University Press, 1975); Dan Sperber, *Explicando la cultura: A Naturalistic Approach* (Oxford: Blackwell Publishers Ltd., 1996).

49. Pascal Boyer, "Orígenes funcionales de los conceptos religiosos: Ontological and Strategic Selection in Evolved Minds", *Journal of the Royal Anthropological Institute* 6, no. 2 (junio de 2000): 195-214. Véase también M. Zuckerman, "Sensation seeking: A comparative approach to a human feature", *Behavioral and Brain Sciences* 7 (1984): 413-71.

50. Bertrand Russell subrayó el papel del lenguaje para facilitar el pensamiento, señalando que "el lenguaje sirve no sólo para expresar pensamientos, sino para hacer posibles pensamientos que no podrían existir sin él" (Bertrand Russell, *Human Knowledge* [Nueva York: Routledge, 2009], 58). Describió cómo ciertos "pensamientos bastante elaborados" requieren palabras, y como ejemplo señala la aparente imposibilidad de, sin el lenguaje, tener ningún "pensamiento que se corresponda estrechamente con lo que se afirma en la frase 'la relación entre la circunferencia de un círculo y el diámetro es aproximadamente 3,14159'. " Construcciones menos precisas
pero los que están más allá de los límites de la experiencia, como los árboles parlantes o las nubes que lloran o los guijarros felices, son susceptibles de encarnaciones sin palabras en la mente humana, pero la naturaleza combinatoria y jerárquica del lenguaje es particularmente adecuada para crearlos. Daniel

Dennett ha destacado el papel del lenguaje

en la capacidad humana de inventar uniones de cualidades que individualmente existen en lo real pero que en combinación nos llevan al reino de lo fantástico (Daniel Dennett, *Breaking the Spell: Religion as a Natural Phenomenon* [Nueva York: Penguin Publishing Group, 2006], 121). Como veremos en el capítulo 8, ciertos tipos de arte son particularmente hábiles para facilitar el flujo de ideas en la otra dirección: desde pensamientos articulados en palabras hasta sentimientos de experiencia sin lenguaje.

51. Justin L. Barrett, ¿por *qué alguien creería en Dios?* (Lanham, MD: AltaMira, 2004); Stewart Guthrie, *Caras en las nubes: A New Theory of Religion* (Nueva York: Oxford University Press, 1993).

Capítulo 7: Cerebro y creencia

1. La excavación de Qafzeh comenzó en 1934, llevada a cabo por el arqueólogo francés René Neuville, y fue llevada a cabo por un equipo dirigido por el antropólogo Bernard Vandermeersch. En palabras de Vandermeersch y su equipo, el arreglo del entierro de Qafzeh 11 "atestiguaba una ofrenda funeraria y no una incorporación accidental. Todas estas observaciones apoyan firmemente la interpretación de un entierro deliberado y ceremonial". Véase Hélène Coqueugniot y otros, "Early cranio-encephalic trauma from the Levantine Middle Palaeolithic: 3D reapraisal of the Qafzeh 11 skull, consequences of pediatric brain damage on individual life condition and social care", *PloS One* 9 (23 de julio de 2014): 7 e102822.

2. Erik Trinkaus, Alexandra Buzhilova, Maria Mednikova, y Maria Dobrovolskaya, *El Pueblo de Sunghir: Burials, Bodies and Behavior in the Earlier Upper Paleolithic* (New York: Oxford University Press, 2014).

3. Edward Burnett Tylor, *Primitive Culture, vol*. 2 (Londres: John Murray 1873; Dover Reprint Edition, 2016), 24.

4. Mathias Georg Guenther, *Embaucadores y Tranceros: Bushman Religion and Society* (Bloomington, IN: Indiana University Press, 1999), 180-98.

5. Peter J. Ucko y Andrée Rosenfeld, *Paleolithic Cave Art* (Nueva York: McGraw-Hill, 1967), 117-23, 165-74.

6. David Lewis-Williams, *La mente en la cueva: La conciencia y los orígenes del arte* (Nueva York: Támesis y Hudson, 2002), 11. Aunque muchas obras se crearon también en superficies más accesibles, la existencia de una importante colección que presentaba importantes dificultades de ejecución da relevancia a esta perspectiva.

7. Salomon Reinach, Sectas, *Mitos y Religiones,* trans. Elizabeth Frost (Londres: David Nutt, 1912), 124-38.

8. La propuesta ganó amplia aceptación, pero el posterior descubrimiento de un desajuste entre los animales cuyos huesos han sido desenterrados en las cercanías de varias cuevas y los representados en las paredes de esas cuevas arroja dudas. Si buscas un poco de suerte extra cazando bisontes, vas a pintar un bisonte. O eso es lo que se podría pensar. Pero los datos no confirmaron esta expectativa. Ver Jean Clottes, *¿Qué es el arte paleolítico? Pinturas rupestres y el amanecer de la creatividad humana* (Chicago: University of Chicago Press, 2016).

9. Benjamin Smith, comunicación personal, 13 de marzo de 2019.

10. Pascal Boyer, *Religión explicada: The Evolutionary Origins of Religious Thought* (New York: Basic Books, 2007), 2.

11. Para una discusión detallada ver, por ejemplo, *La Mente Adaptada: Psicología evolutiva y la generación de la cultura,* Jerome H. Barkow, Leda Cosmides, y John Tooby, eds. (Oxford: Oxford University Press, 1992); David Buss, *Evolutionary Psychology: The New Science of Mind* (Boston: Allyn & Bacon, 2012).

12. Para otras contribuciones accesibles a la ciencia cognitiva de la religión, véase, por ejemplo, Justin L. Barrett, *Why Would Anyone Believe in God?* (Lanham, MD: AltaMira Press, 2004); Scott Atran, *In Gods We Trust: The Evolutionary Landscape of Religion* (Oxford: Oxford University Press, 2002); Todd Tremlin, *Minds and Gods: The Cognitive Foundations of Religion* (Oxford: Oxford University Press, 2006).

13. Pascal Boyer, *Religión explicada: The Evolutionary Origins of Religious Thought* (New York: Basic Books, 2007), 46-47; Daniel Dennett, *Breaking the Spell: Religion as a Natural* Phenomenon (Nueva York: Penguin Books, 2006), 122-23; Richard Dawkins, *The God Delusion* (Nueva York: Houghton Mifflin Harcourt, 2006), 230-33.

14. Descrita por primera vez por Darwin, la selección de parientes (o aptitud inclusiva) se desarrolló en R. A. Fisher, *The Genetical Theory of Natural Selection (*Oxford: Clarendon Press, 1930); J. B. S. Haldane, *The Causes of Evolution* (Londres: Longmans, Green & Co., 1932); y W. D. Hamilton, "The Genetical Evolution of Social Behaviour", *Journal of Theoretical Biology 7,* no. 1 (1964): 1-16. Más recientemente, la utilidad de la aptitud inclusiva para comprender el desarrollo evolutivo ha sido cuestionada en M. A. Nowak,
C. E. Tarnita, y E. O. Wilson, "La evolución de la eusocialidad", *Nature* 466 (2010): 1057-62, con una respuesta crítica firmada por 136 investigadores: P. Abbot, J. Abe, J. Alcock, et al., "Inclusive fitness theory and eusociality," *Nature* 471 (2010): E1-E4.

15. David Sloan Wilson, ¿Existe *el altruismo? Culture, Genes and the Welfare of Others* (New Haven: Yale University Press, 2015); David Sloan Wilson, *Darwin's Cathedral: Evolution, Religion and the Nature of Society* (Chicago: University of Chicago Press, 2002).

16. Por ejemplo, Steven Pinker en "The Believing Brain", programa público del Festival Mundial de Ciencia, Ciudad de Nueva York, Teatro Gerald Lynch, 2 de junio de 2018, https://www.worldsciencefestival.com/videos/believing-brain-evolution-neuroscience-spiritual-instinct/46:50-49:16.

17. Charles Darwin, *The Descent of Man and Selection in Relation to Sex* (New York: D. Appleton and Company, 1871), 84. Kindle. El comentario de Darwin asiente en la dirección de un largo debate en la teoría de la evolución sobre el proceso de selección de *grupos*. La teoría evolutiva estándar se basa en la selección natural que opera en organismos individuales: los organismos más capaces de sobrevivir y reproducirse tendrán más éxito en la transmisión de su material genético a los individuos subsiguientes. La selección de grupo es un tipo de selección similar, pero que actúa sobre grupos enteros: aquellos grupos más capaces de sobrevivir (como grupos enteros de individuos) y de reproducirse (en el sentido de obtener un mayor número y separar nuevos grupos) tendrán más éxito en la transmisión de los rasgos dominantes a los grupos subsiguientes. (La observación de Darwin se centra en la cooperación de los individuos que contribuyen al éxito del grupo, que se manifiesta en el aumento de la población del grupo, en contraposición con el grupo que produce un mayor número de grupos similares, pero que aún depende de la interacción fundamental entre los comportamientos beneficiosos para el individuo y los beneficiosos para el grupo). En principio, no hay controversia sobre si la selección del grupo puede ocurrir. La controversia es si ocurre en la práctica. La cuestión es una de escalas de tiempo: La expectativa general es que la típica escala de tiempo durante la cual un individuo se reproducirá o morirá es mucho más corta que las correspondientes escalas de tiempo durante las cuales un grupo se dividirá o disolverá. Y si este es el caso, como los críticos de la selección de grupos argumentan, la selección de grupos es demasiado lenta para importar. En respuesta, David Sloan Wilson, un defensor de larga data de la selección de grupos (en una forma aún más generalizada conocida como selección de *niveles múltiples*), ha argumentado que gran parte del debate se reduce a métodos contables diferentes pero en última instancia equivalentes (diferentes formas de dividir a toda la población) y, por lo tanto, es menos polémico de lo que los desacuerdos actuales han hecho parecer (véase David Sloan Wilson, *¿Existe el altruismo? Culture, Genes and the Welfare of Others* [New Haven: Yale University Press, 2015], 31-46).

18. La importancia de la base emocional del compromiso religioso se examina en R. Sosis, "Religión y cooperación intragrupo": Preliminary results of a comparative analysis of utopian communities", *Cross-Cultural Research* 34 (2000): 70-87; R. Sosis y C. Alcorta, "Signaling, solidarity, and the sacred: The evolution of religious behavior", *Evolutionary Anthropology* 12 (2003): 264-74.

19. Robert Axelrod y William D. Hamilton, "The Evolution of Cooperation", *Science* 211 (marzo de 1981): 1390-96; Robert Axelrod, *The Evolution of Cooperation*, ed. rev. (Nueva York: Perseus Books Group, 2006).

20. Jesse Bering, *The Belief Instinct* (Nueva York: W. W. Norton, 2011).

21. Sheldon Solomon, Jeff Greenberg, y Tom Pyszczynski, *El Gusano en el Núcleo: On the Role of Death in Life* (Nueva York: Random House Publishing Group, 2015), 122.

22. Abram Rosenblatt, Jeff Greenberg, Sheldon Solomon y otros, "Evidence for Terror Management Theory I: The Effects of Mortality Salience on Reactions to Those Who Violate or Uphold Cultural Values", *Journal of Personality and Social Psychology* 57 (1989): 681-90. Para una revisión, ver Sheldon Solomon, Jeff Greenberg y Tom Pyszczynski, "Tales from the Crypt": On the Role of Death in Life", *Zygon* 33, no. 1 (1998): 9-43.

23. Tom Pyszczynski, Sheldon Solomon y Jeff Greenberg, "Treinta años de teoría del manejo del terror", *Avances en Psicología Social Experimental* 52 (2015): 1-70.

24. Pascal Boyer, Religión explicada*: The Evolutionary Origins of Religious Thought* (New York: Basic Books, 2007), 20.

25. William James, *Las variedades de la experiencia religiosa: A Study in Human Nature* (New York: Longmans, Green, and Co., 1905), 485.

26. Stephen Jay Gould, *La riqueza de la vida: The Essential Stephen Jay Gould* (Nueva York: W. W. Norton, 2006), 232-33.

27. Stephen J. Gould, en *Conversaciones sobre el fin de los tiempos* (Nueva York: Fromm International, 1999). 28. Para un estudio del impacto de la conciencia de la mortalidad en la creencia en entidades sobrenaturales, véase, por ejemplo, A. Norenzayan e I. G. Hansen, "Belief in supernatural agents in the face of death", *Personality and Social Psychology Bulletin* 32 (2006): 174-87.

28. Karl Jaspers, *The Origin and Goal of History* (Abingdon, Reino Unido: Routledge, 2010), 2.

29. Wendy Doniger, transcripción de *The Rig Veda* (Nueva York: Penguin Classics, 2005), 25-26.

30. Su Santidad el Dalai Lama, Houston, Texas, 21 de septiembre de 2005. Aunque no he podido localizar una transcripción de la conversación, al menos es una paráfrasis cercana de su respuesta.

31. Al igual que con las raíces históricas de todas las religiones principales, hay un debate académico sobre precisamente cuándo se escribieron varios textos, cuándo alcanzaron la forma canónica, y así sucesivamente. Las fechas que he citado son compatibles con algunas opiniones académicas, pero como no hay un acuerdo universal, deben considerarse como un esbozo.

32. David Buss, *Psicología Evolutiva: La nueva ciencia de la mente* (Boston: Allyn & Bacon, 2012), 90-95, 205-206, 405-409.

33. Para un debate profundo, accesible y animado sobre la creencia humana y los diversos factores que influyen en ella, véase Michael Shermer, *The Believing Brain: From Ghosts and Gods to Politics and Conspiracies* (Nueva York: St. Martin's Griffin, 2011). Aunque la influencia que la emoción puede tener en la creencia puede parecer manifiesta, hasta hace poco el enfoque académico ha tendido a destacar la influencia de la creencia en la emoción, un punto destacado en N. Frijda, A. S. R. Manstead y S. Bem, "The influence of emotions on belief" (La influencia de las emociones en la creencia), en *Emotions and Beliefs: How Feelings Influence Thoughts* (Studies in Emotion and Social Interaction), ed. N. Frijda, A. Manstead, y S. Bem (Cambridge: Cambridge University Press, 2000), 1-9. En N. Frijda y B. Mesquita, "Beliefs through emotions" (Creencias a través de las emociones), en *Emotions and Beliefs, se* describe un estudio del impacto de la emoción en el establecimiento de creencias en contextos en los que antes no se tenía ninguna, así como la influencia de la emoción en la voluntad de cambiar las creencias*: How Feelings Influence Thoughts* (Studies in Emotion and Social Interaction), ed. N. Frijda, A. Manstead, y S. Bem (Cambridge: Cambridge University Press, 2000), 45-77.

34. Pascal Boyer, Religión explicada*: The Evolutionary Origins of Religious Thought* (New York: Basic Books, 2007), 303.

35. Karen Armstrong, *A Short History of Myth* (Melbourne: The Text Publishing Company, 2005), 57.

36. Ibíd.

37. Guy Deutscher, *The Unfolding of Language: An Evolutionary Tour of Mankind's Greatest Invention* (Nueva York: Henry Holt and Company, 2005).

38. William James, *Las variedades de la experiencia religiosa: A Study in Human Nature* (New York: Longmans, Green and Co., 1905), 498.

39. Ibíd., 506-507.

Capítulo 8: Instinto y creatividad

1.Howard Chandler Robbins Landon, *Beethoven: A Documentary Study* (Nueva York: Macmillan Publishing Co., Inc., 1970), 181.

2.Friedrich Nietzsche, *Crepúsculo de los Ídolos,* trans. Duncan Large (Oxford: Oxford University Press, 1998, reedición 2008), 9.

3.George Bernard Shaw, *Back to Methuselah* (Scotts Valley, CA: CreateSpace Independent Publishing Platform, 2012), 277.

4.David Sheff, "Keith Haring, una conversación íntima", *Rolling Stone* 589 (agosto de 1989): 47.

5.Josephine C. A. Joordens y otros, "*Homo erectus* at Trinil on Java used shells for tool production and engraving", *Nature* 518 (12 de febrero de 2015): 228-31.

6.Más precisamente, lo que importa es que los genes de uno se propaguen a la siguiente generación, un objetivo que puede lograrse teniendo una progenie o asegurando que otros individuos que comparten una porción sustancial de los genes de uno tengan progenie.

7.Los rituales de cortejo de los manakin de barba blanca están ricamente descritos en Richard Prum, *La Evolución de la Belleza: Cómo la teoría olvidada de Darwin sobre la elección de pareja da forma al mundo animal y a nosotros* (Nueva York: Doubleday, 2017), 1544-45, Kindle. El parpadeo de las luciérnagas y la elección de pareja se revisa en S. M. Lewis y C. K. Cratsley, "Flash signal evolution, mate choice, and predation in fireflies", *Annual Review of Entomology* 53 (2008): 293-321. Las construcciones de Bowerbird se describen e ilustran en Peter Rowland, *Bowerbirds* (Collingwood, Australia: CSIRO Publishing, 2008), especialmente en las páginas 40 a 47.

8. La resistencia a la selección sexual también se debió, en parte, al poder selectivo cedido a las hembras selectivas, una propuesta que resultó desagradable para los biólogos victorianos, casi todos varones. Véase, por ejemplo, H. Cronin, *La hormiga y el pavo real: Altruism and Sexual Selection from Darwin to Today* (Cambridge: Cambridge University Press, 1991). Obsérvese también que hay ejemplos de especies en las que los machos desempeñan el papel de selector, así como de especies en las que tanto los machos como las hembras desempeñan este papel.

9.Charles Darwin, *The Descent of Man and Selection in Relation to Sex*, ill. ed. (Nueva York: D. Appleton and Company, 1871), 59.

10. Wallace ofreció explicaciones alternativas para los adornos corporales masculinos, como los machos que poseen un exceso de "vigor", que, sin ninguna otra salida disponible, impulsaría el surgimiento de colores vibrantes, colas largas, llamadas prolongadas, etc. También argumentó que los adornos corporales atractivos se correlacionaban necesariamente con la salud y la fuerza y, por lo tanto, ofrecían indicadores de aptitud física exterior, haciendo que la selección sexual no fuera más que un caso particular de selección natural. Ver Alfred Russel Wallace, *Natural Selection and Tropical Nature* (Londres: Macmillan and Co., 1891). El ornitólogo Richard Prum argumenta que los investigadores han descartado injustificadamente las sensibilidades estéticas intrínsecas a favor de explicaciones adaptativas, una posición controvertida que expone en *The Evolution of Beauty: Cómo la teoría olvidada de Darwin sobre la elección de pareja da forma al mundo animal y a nosotros* (Nueva York: Doubleday, 2017).

11.La asimetría hombre-mujer en el ámbito de la estrategia reproductiva fue estudiada e iluminada por Robert Trivers en "Parental Investment and Sexual Selection", en Sexual *Selection and the Descent of Man: The Darwinian Pivot,* ed. Bernard G. Campbell (Chicago: Aldine Publishing Company, 1972), 136-79.

12.Geoffrey Miller, *The Mating Mind: How Sexual Choice Shaped the Evolution of Human Nature* (New York: Anchor, 2000); Denis Dutton, *The Art Instinct* (New York: Bloomsbury Press, 2010). La perspectiva está estrechamente relacionada con una propuesta anterior de Amotz Zahavi, el *principio de la minusvalía*, que prevé que algunos animales anuncien su aptitud a través de exhibiciones llamativas de consumo que pueden tomar la forma de partes del cuerpo o comportamientos

extravagantes. Un pavo real que puede permitirse el lujo de llevar una hermosa pero desgarbada cola asegura a sus potenciales compañeros su fuerza y aptitud, ya que los hermanos más débiles no podrían sobrevivir con un rasgo tan excesivo y desafiante para la supervivencia. La idea, por lo tanto, es que los primeros artistas humanos pueden haber aprovechado la irrelevancia adaptativa de su arte en una exhibición pública análoga de fuerza y aptitud física, fomentando las oportunidades de reproducción y, por lo tanto, transmitiendo la tendencia de que el arte se utilice como medio para atraer parejas. Véase Amotz Zahavi, "Mate selection-A selection for a handicap", *Journal of Theoretical Biology* 53, no. 1 (1975): 205-14.

13. Brian Boyd, "Teorías Evolutivas del Arte", en *El Animal Literario: Evolución y la Naturaleza de la Narrativa*, ed. Jonathan Gottschall y David Sloan Wilson (Evanston, IL: Northwestern University Press, 2005), 147.

Las críticas a la selección sexual como la explicación de la actividad artística humana mencionada en este párrafo se han explicado en varias obras. Aquí hay una muestra: Si la selección sexual es la explicación de las artes, ¿no esperaríamos que el arte fuera una empresa impulsada por los hombres y ajustada para el acceso sexual, es decir, una actividad perseguida con mayor vigor por los hombres en el apogeo de su impulso reproductivo y dirigida exclusivamente a potenciales parejas femeninas? (Brian Boyd, *On the Origin of Stories* [Cambridge: Belknap Press, 2010], 76; Ellen Dissanayake, *Art and Intimacy* [Seattle: University of Washington Press, 2000], 136.) La inteligencia y la creatividad no son necesariamente indicadores confiables de la aptitud física; la combinación de la debilidad física y la destreza creativa no es poco común. (James R. Roney, "Likeable but Unlikely, a Review of the Mating Mind by Geoffrey Miller", *Psycoloquy* 13, no. 10 (2002), artículo 5.) ¿Existen pruebas de que las incursiones artísticas de un hombre proporcionan un mejor medio de anunciar la aptitud física que otras actividades como hacer alarde de las conexiones sociales, mostrar la riqueza, ganar eventos deportivos, etc.? (Stephen Davies, *La Especie Artística: Aesthetics, Art, and Evolution* [Oxford: Oxford University Press, 2012], 125.)

14. Steven Pinker, *How the Mind Works* (Nueva York: W. W. Norton, 1997), 525.

15. Ellen Dissanayake, *Arte e Intimidad: How the Arts Began* (Seattle: University of Washington Press, 2000), 94.

16. Noël Carroll, "Las Artes, la Emoción y la Evolución", en Estética y Ciencias *de la Mente*, ed. Greg Currie, Matthew Kieran, Aaron Meskin y Jon Robson (Oxford: Oxford University Press, 2014).

17. Glenn Gould en *The Glenn Gould Reader*, ed. Tim Page (Nueva York: Libros antiguos, 1984), 240.

18. Brian Boyd, *On the Origin of Stories* (Cambridge, MA: Belknap Press, 2010), 125.

19. Jane Hirshfield, *Nine Gates: Entering the Mind of Poetry* (Nueva York: Harper Perennial, 1998), 18.

20. Saul Bellow, Conferencia Nobel, 12 de diciembre de 1976, de Conferencias *Nobel, Literatura 1968-1980*, ed. Sture Allén (Singapur: World Scientific Publishing Co., 1993).

21. Joseph Conrad, *The Nigger of the "Narcissus"* (Mineola, NY: Dover Publications, Inc., 1999), vi.

22. Yip Harburg, "Yip en el YM-YWHA de la calle 92, 13 de diciembre de 1970", transcripción 1-10-3, p. 3, cintas 7-2-10 y 7-2-20.

23. Yip Harburg, "E. Y. Harburg, Conferencia en la UCLA sobre escritura lírica, 3 de febrero de 1977", transcripción, pp. 5-7, cinta 7-3-10.

24. Marcel Proust, *Remembranza de las cosas pasadas, vol*. 3: *El cautivo, el fugitivo, el tiempo recuperado* (New York: Vintage, 1982), 260, 931.

25. Ibíd., 260.

26. George Bernard Shaw, *Back to Methuselah* (Scotts Valley, CA: Create Space Independent Publishing Platform, 2012), 278.

27.Ellen Greene, "Sappho 58: Philosophical Reflections on Death and Aging", en *The New Sappho on Old Age: Textual and Philosophical Issues,* ed. Ellen Greene y Marilyn B. Skinner, Hellenic Studies Series 38 (Washington, DC: Centro de Estudios Helénicos, 2009); Ellen Greene, ed., *Reading Sappho: Contemporary Approaches* (Berkeley: University of California Press, 1996).

28.Joseph Wood Krutch, "Arte, Magia y Eternidad", *Virginia Quarterly Review* 8, no. 4, (Otoño 1932); https://www.vqronline.org/essay/art-magic-and-eternity.

29. Para una perspectiva alternativa (como en la nota 5 del capítulo 1) algunos autores han sugerido que la ansiedad por la mortalidad y su consiguiente impacto a través de la negación de la muerte, como la describe Ernest Becker, es una influencia moderna, estimulada en gran medida por el aumento de la longevidad y el declive de la religión. Véase, por ejemplo, Philippe Ariès, *The Hour of Our Death*, trans. Helen Weaver (Nueva York: Alfred A. Knopf, 1981).

30.W. B. Yeats, *Collected Poems* (New York: Macmillan Collector's Library Books, 2016), 267.

31. Herman Melville, *Moby-Dick* (Hertfordshire, Reino Unido: Wordsworth Classics, 1993) 235.

32.Edgar Allan Poe, citado en J. Gerald Kennedy, *Poe, Death, and the Life of Writing* (New Haven: Yale University Press, 1987), 48.

33.Tennessee Williams, *Cat on a Hot Tin Roof* (New York: New American Library, 1955), 67-68. 34.

Fyodor Dostoevsky, Crimen *y castigo,* trans. Michael R. Katz (Nueva York: Liveright, 2017), 318. 35.

Sylvia Plath, *The Collected Poems,* ed. Ted Hughes (Nueva York: Harper Perennial, 1992), 255. 36.

Douglas Adams, *Life, the Universe and Everything* (New York: Del Rey, 2005), 4-5.

37.Pablo Casals, del Festival de Bach: Prades 1950, citado en Paul Elie, Reinventando *Bach* (Nueva York: Farrar, Straus y Giroux, 2012), 447.

38.Joseph Conrad, *The Nigger of the "Narcissus"* (Mineola, NY: Dover Publications, Inc., 1999), vi.

39.Helen Keller, Carta a la Orquesta Sinfónica de Nueva York, 2 de febrero de 1924, archivos digitales de la Fundación Americana para los Ciegos, nombre de archivo HK01-07_B114_F08_015_002.tif.

Capítulo 9: Duración e impermanencia

1. Algunos pensadores prominentes han sugerido que la evolución humana ha llegado a su fin. Por ejemplo, Stephen Jay Gould señaló que, desde el punto de vista de la biología, los humanos de hoy son esencialmente los mismos que vivían hace cincuenta mil años (Stephen Jay Gould, "La especia de la vida", de Líder *a Líder* 15 [2000]: 14-19). Otros investigadores que estudian el genoma humano han argumentado lo contrario, que el ritmo de la evolución humana se está acelerando (véase, por ejemplo, John Hawks, Eric T. Wang, Gregory M. Cochran y otros, "Recent acceleration of human adaptive evolution", Actas de *la Academia Nacional de Ciencias* 104, no. 52 [diciembre de 2007]: 20753-58; Wenqing Fu, Timothy D. O'Connor, Goo Jun, y otros, "El análisis de 6.515 exomas revela el origen reciente de la mayoría de las variantes de codificación de proteínas humanas", *Nature* 493 [10 de enero de 2013]: 216-20). Los estudios de diversas poblaciones han proporcionado pruebas de una evolución genética relativamente reciente. Como ejemplo cabe citar la altura de los hombres holandeses, cuyo excepcional aumento medio puede reflejar los efectos de la selección sexual y natural (Gert Stulp, Louise Barrett, Felix C. Tropf, y Melinda Mill, "¿Favorece la selección natural una mayor estatura entre las personas más altas de la Tierra?" *Proceedings of the Royal Society B* 282, no. 1806 [7 de mayo de 2015]: 20150211) y las adaptaciones a los entornos de gran altitud (Abigail Bigham y otros, "Identifying signatures of natural selection in Tibetan and Andean populations using dense genome scan data", *PLoS Genetics* 6, no. 9 [9 de septiembre de 2010]: e1001116).

2. Choongwon Jeong y Anna Di Rienzo, "Adaptaciones a los entornos locales en las poblaciones humanas modernas", Current Opinion *in Genetics & Development 29* (2014), 1-8; Gert Stulp, Louise Barrett, Felix C. Tropf, y Melinda Mill, "Does natural selection favour higher stature among the tallest people on earth?" Actas *de la Royal Society B* 282, nº 1806 (7 de mayo de 2015): 20150211 (y ver nota 1, arriba).

3. Una consideración cautelosa de esta suposición es proporcionada por Steven Carlip, "Transient Observers and Variable Constants, or Repelling the Invasion of the Boltzmann's Brains", *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 06 (2007): 001. Nótese que una posible variación que consideraremos es que el valor de la energía oscura podría cambiar. Como veremos en este capítulo, sólo a finales de los años 90 las observaciones astronómicas convencieron a la comunidad de físicos de que la eliminación por parte de Einstein de la constante cosmológica en 1931 ("¡Apártese del término cosmológico!") era prematura. Prematuro también fue etiquetar la constante cosmológica como "constante". Es muy posible que el valor del término cosmológico de Einstein varíe con el tiempo, una posibilidad que, como veremos, tiene profundas implicaciones para el futuro.

4. Para una perspectiva diferente sobre el futuro de la inteligencia, ver David Deutsch, *The Beginning of Infinity* (New York: Viking, 2011).

5. La escatología física, la física del futuro lejano, ha recibido menos atención que la física del pasado lejano. Sin embargo, ha habido numerosos estudios. Una lista completa de referencias técnicas se encuentra en Milan M. Ćirković, "Carta de Recursos": PEs-1, Physical Eschatology", *American Journal of Physics* 71 (2003): 122. En el debate que sigue, el documento seminal de Freeman Dyson, "Time without end: Physics and biology in an open universe", *Reviews of Modern Physics* 51 (1979): 447-60, ha sido particularmente influyente, al igual que el artículo de Fred C. Adams y Gregory Laughlin, "A dying universe: The long-term fate and evolution of astrophysical objects", *Reviews of Modern Physics* 69 (1997): 337-72, en el que se desarrolla más el tema, incluyendo nuevos resultados sobre la dinámica planetaria, estelar y galáctica, tratado también en su excelente libro de nivel general *The Five Ages of the Universe: Inside the Physics of Eternity* (Nueva York: Free Press, 1999). El tema debe sus orígenes modernos al artículo de M. J. Rees, "El colapso del universo: An eschatological study", *Observatory* 89 (1969): 193-98, así como el artículo de Jamal N. Islam, "Possible Ultimate Fate of the Universe", *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society* 18 (marzo de 1977): 3-8.

6.I.-J. Sackmann, A.I. Boothroyd, y K.E. Kraemer, "Nuestro Sol". III. Present and Future", *Astrophysical Journal* 418 (1993): 457; Klaus-Peter Schroder y Robert C. Smith, "Distant future of the Sun and Earth revisited", Monthly *Notices of the Royal Astronomical Society* 386, no. 1 (2008): 155-63.

7.El lector experto observará que el principio de exclusión de Pauli ya habría desempeñado un papel en la evolución del sol. Antes de la ignición de la fusión del helio en el núcleo del sol, la densidad habría sido lo suficientemente alta como para que la presión de degeneración de los electrones del principio de exclusión fuera relevante. De hecho, la "espectacular y momentánea erupción" que mencioné como marcadora de la transición a la fusión del helio surge debido a las propiedades especiales del gas de electrones degenerados que pueblan el núcleo (el gas no se expande ni se enfría en respuesta al calor generado por el inicio de la fusión del helio, lo que da lugar a una reacción nuclear colosal, no muy diferente de la de una bomba de helio).

8.Alan Lindsay Mackay, *La cosecha de un ojo tranquilo: A Selection of Scientific Quotations* (Bristol, Reino Unido: Instituto de Física, 1977): 117.

9.El reconocimiento inicial del papel esencial del principio de exclusión de Pauli en la estructura de las enanas blancas se hizo en R. H. Fowler, "On Dense Matter", Monthly *Notices of the Royal Astronomical Society* 87, no. 2 (1926): 114-22. El reconocimiento de la importante inclusión de los efectos relativistas se hizo en Subrahmanyan Chandrasekhar, "The Maximum Mass of Ideal White Dwarfs", *Astrophysical Journal* 74 (1931): 81-82. El resultado, conocido como el límite de Chandrasekhar, muestra que la contracción de cualquier estrella con una masa inferior a aproximadamente 1,4 veces la del sol será igualmente detenida por la resistencia debida al principio de exclusión de Pauli. Trabajos posteriores revelaron que en el caso de estrellas más masivas, la fuerza de contracción estelar puede hacer que los electrones se fusionen con los protones, formando neutrones. El proceso permite que las estrellas se contraigan más, pero en algún momento los neutrones estarán tan apretados que el principio de exclusión de Pauli vuelve a ser relevante, deteniendo una vez más la contracción. El resultado es una estrella de neutrones.

10. Mientras que en promedio las separaciones galácticas están creciendo, hay galaxias que están lo suficientemente cerca como para que su mutua atracción gravitacional las impulse a acercarse. Como veremos, tal es el caso, por ejemplo, de las galaxias de la Vía Láctea y Andrómeda.

11.S. Perlmutter y otros, "Measurements of Ω and Λ from 42 High-Redshift Supernovae," *Astrophysical Journal* 517, no. 2 (1999): 565; B. P. Schmidt y otros, "The High-Z Supernova Search: Measuring Cosmic Deceleration and Global Curvature of the Universe Using Type IA Supernovae", *Astrophysical Journal* 507 (1998): 46.

12. Para completar, note que las explicaciones de la expansión espacial acelerada que se toman en serio apuntan todas a la gravedad. Pero en términos generales lo hacen de dos maneras diferentes. O bien el comportamiento de la fuerza de la gravedad en distancias cosmológicas difiere de nuestra expectativa basada en las descripciones de Einstein y Newton, o las fuentes que dan lugar a la gravedad difieren de nuestra expectativa basada en la comprensión convencional de la materia y la energía. Si bien ambos enfoques son viables, el segundo se ha desarrollado más plenamente y se ha aplicado más ampliamente (para explicar no sólo la rápida expansión del espacio sino también las observaciones detalladas de la radiación cósmica de microondas de fondo), y también lo es el enfoque que seguimos.

13.La densidad de la energía oscura es de unos 5 × 10-10 julios por metro cúbico o unos 5 × 10-10 vatios-segundos por metro cúbico. Para hacer funcionar una bombilla de 100 vatios durante un segundo se requiere 2 × ^{1011} veces la energía oscura contenida en un solo centímetro cúbico. Por lo tanto, dicha energía puede hacer funcionar una bombilla de 100 vatios durante unos 5 × 10-12 segundos, o cinco billonésimas de segundo.

14. Si el valor de la energía oscura no cambia con el tiempo, entonces es idéntico a la constante cosmológica de Einstein - un Ave María que Einstein introdujo en sus cálculos en 1917 cuando se dio cuenta de que las ecuaciones de la relatividad general no podían dar cuenta de la opinión consensuada de que a gran escala el universo era estático. El desafío que Einstein había encontrado es que la estasis requiere

equilibrio, pero la gravedad aparentemente tira en una sola dirección. Sin una fuerza de equilibrio, un universo estático parecía imposible. Felizmente, Einstein se dio cuenta entonces de que al insertar un nuevo término en sus ecuaciones, la constante cosmológica, la relatividad general, también permitía una gravedad repulsiva que podía contrarrestar la gravedad atractiva ordinaria y hacer posible un universo estático. (Einstein no se dio cuenta de que el equilibrio era inestable - un pequeño cambio en el tamaño del universo estático, más grande o más pequeño, alteraría el equilibrio, llevando a la expansión o la contracción). Sin embargo, en poco más de una década, Einstein aprendió que el universo se está expandiendo. Con esa comprensión, Einstein borró la famosa constante cosmológica de sus ecuaciones. Pero Einstein había dejado al genio de la gravedad repulsiva fuera de la botella de la relatividad general. Con el tiempo, la gravedad repulsiva serviría grandemente a la cosmología, otorgando el empuje hacia afuera del big bang y, después de eso, ofreciendo una explicación para la expansión acelerada del espacio. Como muchos han dicho, todo esto demuestra que incluso las malas ideas de Einstein son buenas.

15. Robert R. Caldwell, Marc Kamionkowski y Nevin N. Weinberg, "Phantom Energy and Cosmic Doomsday", *Physical Review Letters* 91 (2003): 071301.

16. Abraham Loeb, "Cosmología con estrellas de hipervelocidad", *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 04 (2011): 023.

17. La energía dentro de la Tierra es también un remanente del calor producido cuando la atracción de la gravedad aplastó una nube de polvo y gas en el planeta naciente. Además, también se genera calor a medida que la Tierra gira, porque el movimiento ejerce presión sobre las capas de roca profunda que necesitan una fuerza constante para mantenerse a la altura de la velocidad de rotación.

18. Fred C. Adams y Gregory Laughlin, "Un universo moribundo: El destino a largo plazo y la evolución de los objetos astrofísicos", *Reviews of Modern Physics* 69 (1997): 337-72; Fred C. Adams y Greg Laughlin, *The Five Ages of the Universe: Inside the Physics of Eternity* (Nueva York: Free Press, 1999), 50-52. Consideraciones similares son relevantes para los planetas o lunas que siempre han estado demasiado lejos de su estrella anfitriona para que las condiciones de la superficie sean hospitalarias para que surja la vida. Los procesos internos de esos cuerpos, su astrogeología, pueden producir energía capaz de sostener la vida muy por debajo de sus superficies. La luna de Saturno, Encélado, es una candidata ideal. A una distancia tan grande del sol, su superficie helada es un hogar poco propicio para la vida. Pero los diversos tirones gravitacionales ejercidos por Saturno y sus otras lunas, estirando ligeramente a Encélado de esta manera y comprimiéndola de esa forma, crean tensiones y presiones que calientan su interior, derritiendo el hielo y posiblemente sosteniendo depósitos de agua líquida. No es del todo descabellado imaginar que un día podamos hacer un pequeño agujero en la corteza congelada de Encelado, bajar una sonda, y estar cara a cara con una Encelada nativa, aunque sea oceánica.

19. Para una demostración de esto, vea mi segmento en *The Late Show con Stephen Colbert* en el que se dejó caer una pila de cinco bolas, propulsando las más ligeras a más de treinta pies de altura (seguramente el único récord mundial Guinness que tendré). https://www.youtube.com/watch?v=75szwX09pg8.

20. Dyson da una simple estimación de la velocidad a la que los planetas son expulsados de los sistemas solares así como la velocidad a la que las estrellas son expulsadas de las galaxias: Freeman Dyson, "Tiempo sin fin: Física y biología en un universo abierto", *Reviews of Modern Physics* 51 (1979): 450. Adams y Laughlin proporcionan explicaciones y cálculos más completos, así como contribuciones de investigación originales a algunos de estos procesos (por ejemplo, las implicaciones de las pequeñas estrellas que deambulan por nuestro sistema solar). F. C. Adams y G. Laughlin, "Un universo moribundo: The long-term fate and evolution of astrophysical objects", *Reviews of Modern Physics* 69 (1997): 343-47; Fred C. Adams y Greg Laughlin, *The Five Ages of the Universe: Inside the Physics of Eternity* (Nueva York: Free Press, 1999), 50-51.

21. Para una demostración en vídeo de la metáfora de la lámina de caucho, utilizando el spandex, y un breve análisis del punto planteado en el siguiente párrafo en relación con las ondas gravitatorias y la decadencia de las órbitas planetarias, véase https://www.youtube.com/watch?v=uRijc-AN-F0.

22. R. A. Hulse y J. H. Taylor, "Discovery of a pulsar in a binary system", *Astrophysical Journal* 195 (1975): L51.

23. La posibilidad de que una órbita que decaiga lentamente pueda indicar que se está perdiendo energía por la radiación gravitacional se planteó en R. V. Wagoner, "Test for the existence of gravitational radiation", *Astrophysical Journal* 196 (1975): L63.

24. J. H. Taylor, L. A. Fowler, y P. M. McCulloch, "Measurements of general relativistic effects in the binary pulsar PSR 1913+16", *Nature* 277 (1979): 437.

25. Freeman Dyson, "Tiempo sin fin: Physics and biology in an open universe", *Reviews of Modern Physics* 51 (1979): 451; Fred C. Adams y Gregory Laughlin, "A dying universe: El destino y la evolución a largo plazo de los objetos astrofísicos", *Reviews of Modern Physics* 69 (1997): 344-47.

26. Fred C. Adams y Gregory Laughlin, "Un universo moribundo: El destino y la evolución a largo plazo de los objetos astrofísicos", *Reviews of Modern Physics* 69 (1997): 347-49.

27. Los neutrones, cuando están aislados, tienen una corta vida útil de unos quince minutos. Sin embargo, como los neutrones son más pesados que los protones, su proceso de desintegración implica la producción de un protón (y de un electrón y un antineutrino). Para que un neutrón decaiga dentro de un átomo, el núcleo tendría que acomodar el protón producido, pero a menudo ese requisito no se puede cumplir. Los protones que ya se encuentran en el núcleo llenan las ranuras cuánticas disponibles, que según Pauli y su principio de exclusión no pueden compartirse, lo que refuerza la estabilidad del neutrón en este contexto. Si los protones decaen, al ser más ligeros que los neutrones no producirían neutrones, y no entraría en juego un proceso estabilizador similar.

28. Howard Georgi y Sheldon Glashow, "Unidad de todas las fuerzas de las partículas elementales", *Physical Review Letters* 32, no. 8 (1974): 438.

29. Una tasa de decaimiento del 50 por ciento en 1030 años implica que en una muestra de 1030 protones hay un 50 por ciento de posibilidades de que en un solo año uno de ellos se desmorone.

30. Howard Georgi, comunicación personal, Universidad de Harvard, 28 de diciembre de 1997.

31. Si los protones no se desintegran de la manera prevista por teorías como la gran unificación o la teoría de cuerdas que van más allá de las leyes establecidas de la física de partículas -el modelo estándar de la física de partículas- el despliegue hacia el futuro que he descrito necesitaría varias modificaciones. Por ejemplo, normalmente pensamos en los sólidos, como el hierro, como objetos que mantienen su forma, a diferencia de los líquidos, cuya forma es fluida. Pero en escalas de tiempo suficientemente largas, incluso el hierro actuaría como un fluido, sus átomos constituyentes atravesarían todas las barreras normalmente erigidas por procesos físicos y químicos. En el transcurso de unos 1065 años, un trozo de hierro flotando en el espacio reorganizaría sus átomos, "fundiéndose" en una gota esférica, al igual que el resto de la materia que aún existe. Más allá de las reconfiguraciones de la forma, a lo largo de mayores duraciones la identidad de la materia cambiaría: los átomos más ligeros que el hierro se fusionarían gradualmente, mientras que los átomos más pesados que el hierro se fisionarían aparte. El hierro es la más estable de todas las configuraciones atómicas, y por lo tanto sería el producto final de todos esos procesos nucleares. La escala de tiempo para que tales procesos concluyan es de unos $^{101.500}$ años. En escalas de tiempo aún más largas, la materia haría un túnel cuántico hacia los agujeros negros, que a esta escala temporal se evaporaría inmediatamente por la radiación de Hawking. Nótese, sin embargo, que incluso en el modelo estándar de la física de partículas -sin extensiones exóticas o hipotéticas- se cree que los protones decaerán, sólo que en una escala temporal mucho más larga que los 1038 años que asumimos en el capítulo. Por ejemplo, hay un proceso cuántico exótico totalmente dentro del modelo estándar que los físicos han estudiado teóricamente (conocido como un instantón, haciendo uso de la llamada solución del esfalerón a las ecuaciones de campo electrodébiles) que daría lugar a la desintegración de los protones. El proceso se basa en un evento de tunelización cuántica, por

lo que el plazo para que esto ocurra es largo, con estimaciones que lo sitúan en aproximadamente 10150 años en el futuro, pero mucho menos que los 101.500 años mencionados anteriormente. Los físicos han estudiado otros procesos exóticos que también causarían la decadencia del protón con varias escalas de tiempo que están en su mayoría dentro de, aproximadamente, 10200 años. Así que para esa era futura, es probable que cualquier materia compleja que quede se haya desmoronado. Ver Freeman Dyson, "Tiempo sin fin: Physics and biology in an open universe", *Reviews of Modern Physics* 51 (1979): 451-52, para las estimaciones sobre la fluidez de la materia sólida y la transformación de la materia en hierro. Para referencias técnicas sobre el túnel cuántico que conduce a la decadencia de los protones, véase G. 't Hooft, "Computation of the quantum effects due to a four-dimensional pseudoparticle", *Physical Review D* 14 (1976): 3432, y F. R. Klinkhamer y N. S. Manton, "A saddle-point solution in the Weinberg-Salam theory", *Physical Review D* 30 (1984): 2212.

32. Freeman Dyson, "Tiempo sin fin: Física y biología en un universo abierto", *Reviews of Modern Physics* 51 (1979): 447-60.

33. Dyson calcula la tasa necesaria de disipación de energía *D* para un pensador cuya "complejidad" es *Q* (que es la tasa de producción de entropía por unidad de tiempo subjetivo del pensador, aproximadamente la producción de entropía por pensamiento del pensador), operando a una temperatura T, y encuentra D∝QT2.

34. Más precisamente, en el lenguaje que estoy usando, Dyson asume que si tenemos un conjunto de Pensadores, todos sintonizados para funcionar a diferentes temperaturas, entonces la tasa de los procesos metabólicos de cada Pensador, sean cuales sean, se escalan linealmente con la temperatura. En términos técnicos, Dyson plantea lo que él llama la hipótesis de la escalada *biológica*, que dice lo siguiente: si se tiene una réplica de un ambiente dado, cuántico mecánicamente idéntico al original salvo por la temperatura del nuevo ambiente que es *Tnew* mientras que la del ambiente original era Toriginal, y si se hace una réplica de un sistema vivo de manera que su mecánica cuántica Hamiltoniana, hasta una transformación unitaria, está dada por *Hnew* = (*Tnew* / Toriginal) Horiginal, entonces la copia está de hecho viva y tiene experiencias subjetivas idénticas al original, excepto que todas sus funciones internas se reducen por un factor de *Tnew* / Toriginal.

35. Para el lector matemáticamente inclinado, note que si la temperatura, *T*, es una función del tiempo, *t*, según *T*(*t*) ~ *t-p*, la integral de la expresión en la nota 33, *QT2*, convergerá para *p* > ½, mientras que el número total de pensamientos (la integral de T(t)) divergirá para p < 1. Así, con ½ < p < 1, *el* Pensador puede llevar a cabo un número infinito de pensamientos mientras requiere un suministro finito de energía.

36. Para el lector con inclinación matemática, la cuestión clave aquí es que la tasa máxima de eliminación de desechos (suponiendo que el Pensador expulse los desechos mediante radiación dipolo basada en electrones) es proporcional a T3, mientras que la energía disipada es proporcional a T2. Esto implica que hay un límite más bajo en T para evitar que el calor de los desechos se acumule más rápido de lo que puede ser expulsado.

37. Entre los informáticos responsables de estos influyentes resultados se encuentran Charles Bennett, Edward Fredkin, Rolf Landauer y Tommaso Toffoli, entre muchos otros. Para una exposición perspicaz y accesible, véase Charles H. Bennett y Rolf Landauer, "The Fundamental Physical Limits of Computation", *Scientific American* 253, no. 1 (julio de 1985): 48-56.

38. Más precisamente, es *virtualmente* imposible deshacer el cálculo. Como el acto de borrado es en sí mismo un proceso físico, en principio podríamos deshacerlo por el mismo proceso que utilizaríamos para deshacer la rotura de un cristal: invertir el movimiento de cada partícula en todas partes. Pero de nuevo, en cualquier sentido práctico, eso no es factible.

39. Varios autores han considerado el impacto de una constante cosmológica en el futuro de la vida y la mente. Mucho antes del descubrimiento observacional de la energía oscura, John Barrow y Frank Tipler analizaron la física de la computación en un universo con una constante cosmológica y sostuvieron que el procesamiento de la información necesariamente llega a su fin, poniendo fin a la

vida y a la mente (John D. Barrow y Frank J. Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle* [Oxford: Oxford University Press, 1988], 668-69). Lawrence Krauss y Glenn Starkman volvieron a examinar el análisis de Dyson en un universo con una constante cosmológica y llegaron a una conclusión similar (Lawrence M. Krauss y Glenn D. Starkman, "Life, the Universe, and Nothing: Life and Death in an Ever-Expanding Universe", *Astrophysical Journal* 531 [2000]: 22-30). Krauss y Starkman también argumentaron con argumentos generales que la naturaleza discreta de los estados para un sistema cuántico de tamaño finito pondría igualmente en peligro el pensamiento infinito en *cualquier* espaciotiempo en expansión, incluso en ausencia de una constante cosmológica. Sin embargo, Barrow y Hervik argumentaron que, al utilizar gradientes de temperatura generados por las ondas gravitatorias, el procesamiento de la información puede, de hecho, continuar indefinidamente en un universo que no tiene una constante cosmológica (John D. Barrow y Sigbjørn Hervik, "Indefinite information processing in ever-expanding universes", *Physics Letters B* 566, nos. 1-2 [24 de julio de 2003]: 1-7). Freese y Kinney llegaron a una conclusión similar, argumentando que en un espaciotiempo cuyo tamaño de horizonte aumenta con el tiempo (a diferencia del de un universo con una constante cosmológica en el que el tamaño del horizonte es fijo), el espacio fásico adquiere continuamente nuevos modos (aquellos cuyas longitudes de onda caen por debajo del tamaño del horizonte en aumento), que dan al sistema un suministro continuo de nuevos grados de libertad que pueden transportar residuos al medio ambiente, permitiendo así que la computación proceda indefinidamente en un futuro lejano (K. Freese y W. Kinney, "The ultimate fate of life in an accelerating universe", *Physics Letters B* 558, nos. 1-2 [10 de abril de 2003]: 1–8).

40.K. Freese y W. Kinney, "El destino final de la vida en un universo en aceleración", Letras *Físicas B* 558, nos. 1-2 [10 de abril de 2003]: 1-8.

Capítulo 10: El crepúsculo del tiempo

1. El hecho de que los procesos con probabilidades minúsculas puedan aprovechar largas duraciones para abrirse camino en la realidad es algo que hemos encontrado en capítulos anteriores. En una explicación de lo que puede haber encendido el big bang, observé que el despliegue cósmico podría haber esperado mucho tiempo para la configuración altamente improbable de un campo de inflado uniforme para llenar una pequeña región, donde se originaría la gravedad repulsiva y se pondría en marcha la expansión del espacio. Para otro ejemplo importante y general, también subrayé que la segunda ley de la termodinámica no es una ley en el sentido convencional sino que es una tendencia estadística. Las disminuciones entropicales son extraordinariamente raras, pero si se espera lo suficiente, incluso la más improbable de las cosas sucederá.

2.Freeman Dyson en Jon Else, dir., *The Day After Trinity* (Houston: KETH, 1981).

3.Comunicación personal con John Wheeler, Universidad de Princeton, 27 de enero de 1998.

4.W. Israel, "Event Horizons in Static Vacuum Space-Times", *Physical Review* 164 (1967): 1776; W. Israel, "Event Horizons in Static Electrovac Space-Times", *Communications in Mathematical Physics* 8 (1968): 245; B. Carter, "Axisymmetric Black Hole Has Only Two Degrees of Freedom", *Physical Review Letters* 26 (1971): 331.

5.Jacob D. Bekenstein, "Agujeros negros y entropía", *Physical Review D* 7 (15 de abril de 1973): 2333. Para un bello y accesible resumen matemático de los cálculos de Bekenstein, véase Leonard Susskind, *The Black Hole War: My Battle with Stephen Hawking to Make the World Safe for Quantum Mechanics* (New York: Little, Brown and Co., 2008), 151-54.

6.Más precisamente, el área aumenta en una unidad cuadrada si la unidad es elegida para ser un cuarto de la longitud cuadrada de Planck.

7. Las propiedades magnéticas del electrón, que son muy sensibles a las fluctuaciones cuánticas en el espacio vacío, proporcionan el acuerdo más impresionante entre las observaciones y las predicciones matemáticas. Los cálculos matemáticos son nada menos que heroicos. A finales de los años 40, Richard Feynman introdujo un esquema gráfico para organizar tales cálculos cuánticos, utilizando lo que ahora se conoce como *diagramas de Feynman*. Cada diagrama representa una contribución matemática que requiere una evaluación cuidadosa, y al final del cálculo, todos esos términos deben ser sumados. Para determinar las contribuciones cuánticas a las propiedades magnéticas de los electrones (el momento del dipolo del electrón), los investigadores necesitaron evaluar más de doce mil diagramas de Feynman. El espectacular acuerdo entre tales cálculos y las mediciones experimentales se encuentra entre los mayores triunfos que surgen de nuestra comprensión de la física cuántica (véase Tatsumi Aoyama, Masashi Hayakawa, Toichiro Kinoshita y Makiko Nio, "Tenth-order electron anomalous magnetic moment: Contribución de los diagramas sin bucles leptónicos cerrados", *Physical Review D* 91 [2015]: 033006).

8. Aunque utilizo el carbón como analogía, cabe señalar una diferencia esencial entre la radiación emitida por una quema familiar y la emitida por un agujero negro. Cuando el carbón brilla, la radiación se emite directamente de la quema del material que constituye el carbón; la radiación, por lo tanto, lleva una impresión de la composición específica del material del carbón. Por el contrario, el material que constituye un agujero negro ha sido aplastado en la singularidad del agujero negro, y cuanto más masivo es el agujero negro, mayor es la separación entre la singularidad y el horizonte de sucesos del agujero negro, por lo que la radiación emitida desde el horizonte de sucesos no parece llevar una huella de la composición material del agujero negro. Esta diferencia es una forma de entender el origen de lo que se conoce como la paradoja de *la información del agujero negro.* Si la radiación emitida por un agujero negro es insensible a los ingredientes específicos de los que se formó el agujero negro, entonces para cuando el agujero negro se haya transformado completamente en radiación, la información contenida en esos ingredientes se habrá perdido. Tal pérdida de información interrumpiría la progresión mecánica cuántica del universo, por lo que los físicos han pasado décadas tratando de establecer que la información no se ha perdido. La mayoría de los físicos ahora están de acuerdo en que tenemos fuertes argumentos que apoyan la afirmación de que la información se conserva, pero hay numerosos detalles importantes que todavía están en la vanguardia de la investigación.

9. La fórmula de Hawking muestra que la radiación de cuerpo negro emitida por un agujero negro de Schwarzschild (un agujero negro sin carga y sin rotación) de masa *M viene* dada por $T_{Hawking} = hc^3/16\pi^2 GMk_b$ (*h* es la constante de Planck, *c es* la velocidad de la luz, *G* es la constante de Newton, y *kb* es la constante de Boltzmann). S. W. Hawking, "Particle Creation by Black Holes", *Communications in Mathematical Physics* 43 (1975): 199-220.

10. Don N. Page, "Tasas de emisión de partículas de un agujero negro: Partículas sin masa de un agujero no cargado y no giratorio", *Physical Review D* 13 no. 2 (1976), 198-206. Los números citados actualizan el cálculo de Page basado en evaluaciones más recientes de las propiedades de las partículas, especialmente las masas no nulas para los neutrinos.

11. Más precisamente, una bola cuyo radio no es mayor que el llamado radio de Schwarzschild, cuya forma matemática en términos de la masa, *M,* es $R_{Schwarzschild} = 2GM/c^2$.

12. Obsérvese que me refiero a lo que podría llamarse la densidad *media efectiva* de un agujero negro*:* su masa total dividida por el volumen total contenido en una esfera de radio igual al de su horizonte de sucesos. La noción es intuitivamente útil pero es, como el lector experto reconocerá, en el mejor de los casos heurística. Cuando se forma un agujero negro, la dirección radial dentro de su horizonte de sucesos se vuelve temporal, y así la noción del volumen espacial interior del agujero negro se convierte en una noción más sutil (y, de hecho, se vuelve divergente). Además, la masa del agujero negro no llena uniformemente tal volumen, por lo que la densidad media que hemos calculado no se realiza físicamente por el propio agujero negro. No obstante, la densidad media de un agujero negro, tal como la hemos definido, da una idea intuitiva de por qué los agujeros negros más grandes producen entornos externos menos extremos y dan lugar a la radiación Hawking con temperaturas más bajas.

13.En el capítulo anterior, observamos que la expansión acelerada del espacio da lugar a una temperatura de fondo diminuta y constante de unos $^{10-30}$K. La temperatura de un agujero negro con una masa superior a unas 1023 veces la masa del sol sería menor que la temperatura ambiente del espacio en un futuro lejano. Sin embargo, tal agujero negro sería más grande que el propio horizonte cosmológico.

14.De acuerdo con las matemáticas, cuando los fotones pasan a través del campo de Higgs no experimentan resistencia a la fricción en absoluto, lo que hace que no tengan masa y que el campo de Higgs sea invisible.

15.Peter Higgs en "¿Qué es el espacio?", el primer episodio del documental de *NOVA "La tela del cosmos"*, basado en el libro del mismo nombre. Otros físicos que desarrollaron ideas similares a las de Higgs por la misma época incluyen a Robert Brout y François Englert, y Gerald Guralnik, C. Richard Hagen, y Tom Kibble. Higgs e Englert compartieron el Premio Nobel por su trabajo.

16. Hay menos significado en este número en particular de lo que podría parecer. El valor 246 (o, más precisamente, 246,22 GeV, donde GeV significa la unidad convencional de voltios de gigaelectrón) depende de las convenciones matemáticas que los físicos generalmente invocan. Pero menos convenciones estándar darían lugar a una física equivalente con diferentes valores numéricos.

17.Sidney Coleman, "Destino del falso vacío", *Physical Review D* 15 (1977): 2929; Erratum, *Physical Review D* 16 (1977): 1248.

18.Más precisamente, la esfera se extendería lentamente al principio y luego aumentaría su velocidad rápidamente hacia la de la luz.

19.A. Andreassen, W. Frost, y M. D. Schwartz, "Scale Invariant Instantons and the Complete Lifetime of the Standard Model", *Physical Review D* 97 (2018): 056006.

20.La posibilidad de que nuestro universo pudiera haber surgido de un baño uniforme de partículas de alta entropía que chocaban y se movían en el vacío, en el que una rara caída espontánea a una menor entropía daba como resultado las estructuras ordenadas que presenciamos, fue planteada por Ludwig Boltzmann en dos documentos (Ludwig Boltzmann, "On Certain Questions of *the Theory* of Gases", *Nature* 51 [1895]: 1322, 413-15; Ludwig Boltzmann, *"Entgegnung auf die wärmetheoretischen Betrachtungen des Hrn. E. Zermelo," Annalen der Physik* 57 [1896]: 773-84). Más tarde, Arthur Eddington señaló que, dado que es más probable que se produzcan disminuciones menos significativas de la entropía, es mucho más probable que esa fluctuación no dé lugar a un universo entero lleno de estrellas, planetas y personas -una drástica disminución de la entropía- sino que sólo dé lugar a "físicos matemáticos" (observadores que participan en los mismos experimentos de pensamiento que él estaba explorando) dentro de un entorno por lo demás desorganizado (A. Eddington, "The End of the World: Desde el punto de vista de la física matemática", *Nature* 127, nº 1931 [3203]: 447-53). Mucho más tarde, la noción de "físicos matemáticos" se redujo aún más a una gota entrópica aún más modesta, dando lugar a los componentes cogitantes de los observadores, denominados "cerebros de Boltzmann" (por lo que sé, el primer uso explícito del término fue en A. Albrecht y L. Sorbo, "¿Puede el Universo permitirse la inflación?" *Physical Review D* 70 [2004]: 063528).

21. Por las razones que se destacan en el capítulo, me centraré en la creación espontánea de estructuras que puedan pensar -cerebros de Boltzmann-, pero la creación espontánea de universos totalmente nuevos o la recreación espontánea de condiciones que desencadenen una expansión cosmológica inflacionaria también son dignas de atención. Para no sobrecargar el capítulo, considero esas posibilidades en las notas 22 y 34.

22. El lector experto reconocerá que estoy deslizándome sobre la sutileza y la controversia. No hay un consenso universal sobre cómo calcular las probabilidades de las diversas fluctuaciones cosmológicas espontáneas a las que me refiero. Leonard Susskind y sus colaboradores defendieron un enfoque en L. Dyson, M. Kleban y L. Susskind, "Disturbing Implications of a Cosmological Constant", *Journal of*

High Energy Physics 0210 (2002): 011, basado en una idea anterior de Susskind conocida como "complementariedad del horizonte". Recordemos que debido a que la expansión del espacio se está acelerando, estamos rodeados por un lejano horizonte cosmológico. Las ubicaciones más lejanas al horizonte cosmológico se alejan de nosotros más rápido que la velocidad de la luz, por lo que no hay posibilidad de que nos influya nada situado a esa distancia o más allá de ella. Susskind, motivado por ese aislamiento (y por su anterior trabajo sobre los agujeros negros, que tienen su propia variedad de horizonte), aboga por considerar sólo los procesos físicos que tienen lugar dentro de nuestra "mancha causal" -puedes pensar en esto como la región del espacio que se encuentra dentro de nuestro horizonte cosmológico- descartando efectivamente toda la física en la expansión potencialmente infinita del espacio que se encuentra más allá. Más precisamente, Susskind sostiene que la física fuera de nuestra mancha causal es redundante con la física dentro de nuestra mancha causal (de la misma manera que las descripciones de las ondas y las partículas en la mecánica cuántica son dos formas complementarias de discutir la misma física, la física de la mancha interior y la de la mancha exterior también serían formas complementarias de discutir la misma física). Con esta suposición, la realidad se considera como una mancha finita del espacio, con una constante cosmológica fija, *Λ,* que produce una temperatura $T \sim \sqrt{\Lambda}$, algo así como el caso canónico del gas caliente en una caja estudiado en la mecánica estadística elemental. El cálculo de las probabilidades relativas de dos macrostatos diferentes equivale entonces a tomar las proporciones del número de microstatos asociados a cada uno. Es decir, la probabilidad de una configuración dada es proporcional a (la exponencial de) su entropía. Con este enfoque, Susskind y sus colaboradores observan que la unión de partículas dentro de nuestro parche para producir las condiciones necesarias para un big bang inflacionario es extraordinariamente menos probable (porque tiene baja entropía) que las partículas que se unen para producir directamente el mundo tal como lo conocemos, desde las estrellas hasta las personas (porque tal configuración tiene mayor entropía). Un enfoque alternativo para calcular las probabilidades se sugiere en A. Albrecht y L. Sorbo, "¿Puede el Universo permitirse la inflación?" *Physical Review D* 70 (2004): 063528, que se basa en la inflación que surge de un evento local de túnel cuántico. Este enfoque da lugar a probabilidades radicalmente diferentes. Albrecht y Sorbo consideran que las fluctuaciones para reducir la entropía -una región que posteriormente se inflará- dentro de un entorno de fondo que en sí mismo tiene una alta entropía; esto asegura que la configuración completa todavía tiene una alta entropía, aumentando así las probabilidades. Susskind y sus colaboradores consideran la entropía sólo dentro de la fluctuación misma, razonando que debido a que la región se inflará posteriormente, todo lo que está fuera de la región se encuentra más allá de su horizonte cosmológico y por lo tanto puede ser ignorado. La menor entropía total que Susskind y colaboradores asignan a la fluctuación disminuye drásticamente su probabilidad de ocurrir.

23. En la nota 9 del capítulo 2, expliqué que la entropía de un sistema se define más adecuadamente como el logaritmo natural del número de estados cuánticos accesibles. Así, si un sistema tiene entropía *S*, el número de tales estados es *eS*. Si suponemos que un sistema pasa casi el mismo tiempo en cualquiera de los microestados compatibles con su macroestado, entonces la probabilidad *P* de una fluctuación desde un estado inicial de entropía *S1* a un estado de entropía final *S2 viene* dada por la relación del número de microestados asociados a cada uno, de ahí que *P = eS2/eS1* = $e^{(S2 - S1)}$. Para mayor claridad, escribe *S2 = S1 - D*, donde *D significa* la "caída" de entropía del valor inicial de S1. Entonces *P* = $e^{(S1 - D - S1)}$ = *e-D*, donde vemos la disminución exponencial de la probabilidad en función de la caída de la entropía. ¿Cuál es entonces la probabilidad de formar un cerebro de Boltzmann? Bueno, a la temperatura *T*, las partículas de nuestro baño térmico tienen energías muy iguales a *T* (usando unidades con *kB* = 1), y por lo tanto para construir un cerebro de masa M necesitamos desviar alrededor de *M/T* tales partículas (usando unidades con c = 1). Dado que la entropía del baño rastrea el número de partículas, la gota *D* es esencialmente igual a *M/T* y por lo tanto la probabilidad es aproximadamente *e-M/T*. Para un ejemplo particularmente relevante, podemos fijar nuestras miras en un futuro muy lejano y tomar que *T es igual a* la temperatura del baño termal que surge del horizonte cosmológico, alrededor de $^{10-30}$K, que es alrededor de 10-41 GeV (donde un GeV, voltio de gigaelectrón, es aproximadamente igual a la energía equivalente a la masa de un protón). Dado que un cerebro tiene

alrededor de $^{1027 \text{ protones}}$, *M/T* es alrededor de $^{1027/10-41}$ = 1068. La probabilidad de formar un cerebro espontáneamente es por tanto aproximadamente igual a *e-1068.* El tiempo necesario para tener una posibilidad razonable de que un evento tan raro tenga lugar es proporcional a 1/(*e-1068*), es decir, *e1068,* que en este capítulo, para mayor facilidad, nos aproximamos a 101068.

24. Aunque el tiempo puede ser ilimitado, hay una escala de tiempo natural pero finita de relevancia conocida como "tiempo de recurrencia". Discuto esto en la nota final 34, así que aquí basta decir que el tiempo de recurrencia es tan largo que el número de cerebros de Boltzmann que surgirán antes de que alcancemos ese límite es -incluso con la diminuta tasa de formación- vasto.

25. El lector particularmente diligente reconocerá que estamos invocando implícitamente el principio de indiferencia descrito en la nota 8 del capítulo 3. Es decir, cuando considero el origen de mi cerebro, estoy asignando igual probabilidad a cada encarnación que tiene la misma configuración física. Dado que casi todas ellas se habrían formado a la manera de Boltzmanni, es muy improbable que la historia habitual que cuento sobre cómo llegó a ser mi cerebro sea cierta. Sin embargo, como en la nota 8 del capítulo 3, se puede plantear un desafío contra el uso del principio de indiferencia en situaciones que no se asemejan a aquellas en las que el principio ha sido verificado empíricamente (lanzamientos de monedas, tiradas de dados y el vasto surtido de situaciones de azar que encontramos en la vida cotidiana). No obstante, muchos destacados cosmólogos no están satisfechos con este enfoque y, por lo tanto, consideran que los rompecabezas de Boltzmann Brain que describo en el capítulo son una seria preocupación.

26. Véase David Albert, *Time and Chance* (Cambridge, MA: Harvard University Press, 2000), 116; Brian Greene, *The Fabric of the Cosmos* (New York: Vintage, 2005), 168.

27. Permítanme mencionar otros dos enfoques relacionados para resolver el problema. Uno es imaginar que con el tiempo las "constantes" de la naturaleza se desvían de tal manera que los procesos físicos necesarios para formar cerebros de Boltzmann son suprimidos. Véase, por ejemplo, Steven Carlip, "Transient Observers and Variable Constants, or Repelling the Invasion of the Boltzmann's Brains", *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 06 (2007): 001. Otro, argumentado por Sean Carroll y colaboradores, es que las fluctuaciones necesarias para formar los cerebros de Boltzmann no surgen bajo un cuidadoso tratamiento de mecánica cuántica (K. K. Boddy, S. M. Carroll y J. Pollack, "De Sitter Space Without Dynamical Quantum Fluctuations", *Foundations of Physics* 46, Nº 6 [2016]: 702).

28. Véase, por ejemplo, A. Ceresole, G. Dall'Agata, A. Giryavets y otros, "Domain walls, near-BPS bubbles, and probabilities in the landscape", *Physical Review D* 74 (2006): 086010. El físico Don Page ha adoptado un enfoque diferente para formular el problema del cerebro de Boltzmann, señalando que en cualquier volumen finito de espacio que experimente una expansión acelerada, como el nuestro, habrá -sobre un tiempo ilimitado- un número ilimitado de cerebros creados espontáneamente. Para evitar que nuestros cerebros sean miembros atípicos en este volumen en expansión, Page sugiere que nuestra región no tiene tiempo ilimitado sino que se dirige hacia una cierta variedad de destrucción. Sus cálculos (Don N. Page, "¿Nuestro universo está decayendo a un ritmo astronómico?" Letras *Físicas B* 669 [2008]: 197-200) indican que el tiempo máximo de vida de nuestro universo podría ser tan bajo como veinte mil millones de años. Otros físicos (véase, por ejemplo, R. Bousso y B. Freivogel, "A Paradox in the Global Description *of the* Multiverse", *Journal of High Energy Physics* 6 [2007]: 018; A. Linde, "Sinks in the Landscape, Boltzmann Brains, and the Cosmological Constant Problem", *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 0701 [2007]: 022; A. Vilenkin, "Predictions from Quantum Cosmology", *Physical Review Letters* 74 [1995]: 846) han sugerido otras formas de evitar el problema del cerebro de Boltzmann utilizando diferentes formalismos matemáticos para calcular la probabilidad de que se formen. En resumen, sigue habiendo mucho desacuerdo sobre la forma de calcular la probabilidad de este tipo de procesos, lo que sin duda es una fuente fructífera de controversia para impulsar nuevas investigaciones.

29.Kimberly K. Boddy y Sean M. Carroll, "¿Puede el bosón de Higgs salvarnos de la amenaza de los cerebros de Boltzmann?" 2013, arXiv:1308.468.

30. Al menos, esa es la historia que cuentan las ecuaciones de Einstein. Determinar si ese poderoso crujido sería realmente el final o si alguna variedad de proceso exótico se remontaría en el último momento requerirá un tratamiento cuántico completo de la gravedad. El consenso general actual es que el túnel hacia un valor negativo produce un estado terminal, en ese ámbito, un verdadero fin del tiempo.

31.Paul J. Steinhardt y Neil Turok, "The cyclic model simplified", *New Astronomy Reviews* 49 (2005): 43-57; Anna Ijjas y Paul Steinhardt, "A New Kind of Cyclic Universe" (2019): arXiv:1904.0822[gr-qc].

32.Alexander Friedmann, trans. Brian Doyle, "Sobre la curvatura del espacio", *Zeitschrift für Physik* 10 (1922): 377-386; Richard C. Tolman, "Sobre el problema de la entropía del universo en su conjunto", *Physical Review* 37 (1931): 1639-60; Richard C. Tolman, "Sobre los requisitos teóricos para un comportamiento periódico del universo", *Physical Review* 38 (1931): 1758-71.

33. Sin embargo, lo más probable es que el caso no esté claro. La razón es que el paradigma inflacionario también puede dar cabida a la falta de ondas gravitatorias primordiales: los modelos que reducen la escala energética de la inflación producirían ondas demasiado débiles para ser observadas. Algunos investigadores argumentarían a viva voz que esos modelos no son naturales y que, por lo tanto, son menos convincentes que el modelo cíclico. Pero ese es un juicio cualitativo sobre el cual los diferentes investigadores tendrán opiniones diferentes. Los datos potenciales a los que hago referencia (o, en realidad, la falta de ellos) seguramente abrirían un acalorado debate en la comunidad de la física entre los defensores de estas dos teorías cosmológicas, pero no es probable que se abandone el escenario inflacionario.

34. Aunque nos habría llevado demasiado lejos en el capítulo, señalaré aquí que hay una versión de la cosmología cíclica que también puede surgir de escenarios cosmológicos más estándar. Aunque difiere sustancialmente del enfoque cíclico que se acaba de describir, esta cosmología implica episodios secuenciales, pero con escalas de tiempo enormemente más largas y que surgen por medio de un mecanismo completamente diferente. La física esencial fue derivada hacia finales del siglo XIX por el matemático Henri Poincaré, y ahora se denomina Teorema de Recurrencia *de Poincaré.* Para entender el meollo del teorema, piense en barajar una baraja de cartas. Debido a que sólo hay muchos órdenes diferentes de las cartas (un número enorme, sí, pero definitivamente finito), si se continúa barajando, tarde o temprano el orden de las cartas debe repetirse. Poincaré se dio cuenta de que si tienes, digamos, moléculas de vapor rebotando aleatoriamente alrededor de un recipiente, una clase similar de repetición también está garantizada. Por ejemplo, imagina que coloco un grupo apretado de moléculas de vapor en una esquina de un contenedor y luego dejo que se dispersen. Rápidamente llenarán el contenedor y durante un tiempo espectacularmente largo mantendrán una apariencia uniforme mientras continúan moviéndose aleatoriamente alrededor del espacio disponible. Pero si esperamos lo suficiente, las moléculas, por casualidad, migrarán a configuraciones más ordenadas, de menor entropía. Poincaré fue más allá. Argumentó que las moléculas, a través de sus movimientos aleatorios, se acercarán arbitrariamente a la misma configuración de la que partieron: un grupo fuertemente agrupado en una esquina del contenedor. El razonamiento, aunque técnico, es similar a la forma en que concluimos que el orden de una baraja de cartas barajada sin fin debe repetirse. Una lista interminable de posiciones y velocidades de partículas aleatorias también se repite necesariamente. Ahora, usted puede ser escéptico de esta afirmación - después de todo, a diferencia del caso de las cartas barajadas, hay infinitas configuraciones diferentes para las moléculas de vapor en el recipiente. Pero Poincaré se encargó de esta complicación no argumentando una recreación exacta de una configuración anterior, sino más bien una recreación arbitrariamente cercana. Cuanto más precisa sea la recreación deseada, más tiempo tendrá que esperar a que suceda, pero elija cualquier tolerancia que desee y las partículas recrearán la configuración anterior dentro de esa especificación.

Aunque el razonamiento de Poincaré era clásico, en los años 50 su teorema se extendió a la mecánica cuántica. Si se inicia un sistema cerrado con probabilidades particulares de que sus partículas se encuentren en lugares determinados, y se le permite evolucionar durante un tiempo suficientemente largo, las

probabilidades se acercarán arbitrariamente a sus valores iniciales, un ciclo que también se repetirá indefinidamente. Esencial para el argumento de Poincaré, ya sea clásico o cuántico, es el hecho de que el vapor está confinado a un contenedor. De lo contrario, las moléculas continuarían dispersándose hacia afuera, para nunca regresar. Dado que el universo no es un contenedor cerrado, se podría pensar que su teorema no tiene relevancia cosmológica. Sin embargo, como discutimos en la nota 22 de este capítulo, Leonard Susskind ha argumentado que un horizonte cosmológico actúa efectivamente como las paredes de un contenedor: confina la parte del universo con la que podemos interactuar a un tamaño finito, haciendo aplicable el teorema de Poincaré. Y así, de la misma manera que el vapor en el contenedor, durante períodos extraordinariamente largos, volverá arbitrariamente cerca de cualquier configuración dada, también lo hará para las condiciones dentro de nuestro horizonte cosmológico: cualquier configuración dada de partículas y campos se realizará, con cualquier precisión, una y otra vez. Es una versión literal de un eterno retorno. Basándonos en el tamaño de nuestro horizonte cosmológico, podemos calcular la escala de tiempo necesaria para las recurrencias, y el resultado es la escala de tiempo más larga que hemos encontrado hasta ahora: unos $10^{10^{120}}$ años.

No se puede evitar pensar en tales recurrencias en términos terrenales. Cada uno de los cientos de miles de millones de personas que han vivido y muerto eran configuraciones de partículas. Si esas configuraciones se realizan una vez más, bueno, como puedes ver, esta línea de pensamiento se dirige hacia lugares que la ciencia generalmente evita con una venganza. Pero antes de dejarse llevar demasiado, observe que, como hemos visto, las gotas espontáneas de entropía pueden amenazar la base misma de la comprensión racional. Si una reconfiguración aleatoria de partículas y campos provoca un nuevo despliegue cosmológico - un nuevo big bang- que en última instancia da lugar a estrellas, planetas y personas, eso es una cosa. Sin embargo, si resulta que hay una mayor probabilidad de recrear espontáneamente condiciones como las del universo actual -sin big bang y sin despliegue cosmológico- nos encontraremos en el mismo pantano que encontramos con los cerebros de Boltzmann. Incluso si nuestro universo surgiera de la manera cosmológica que hemos descrito en los capítulos anteriores, mirando hacia el futuro lejano llegaríamos a la conclusión de que la gran mayoría de los observadores como nosotros (algunos de los cuales tendrían los mismos recuerdos que nosotros y, por tanto, afirmarían ser nosotros) no habría surgido a través de esa secuencia cosmológica. Sin embargo, cada uno pensará que sí lo hicieron. Como con los cerebros de Boltzmann, nos habremos encontrado con un atolladero epistemológico. Usted podría sugerir que esto no socavaría *nuestra comprensión de la* realidad, usted y yo y todo lo familiar podría haber surgido de un auténtico desarrollo cosmológico. La inquietante idea, sin embargo, es que todos en el futuro pueden aferrarse a la misma historia de consuelo, y sin embargo la mayoría de ellos estarían equivocados. Dado que la gran mayoría de los observadores a lo largo de la línea de tiempo no habrían surgido de la evolución cosmológica estándar, necesitaríamos un argumento convincente de que no estamos entre los ilusos. Y ese es un argumento que los físicos han intentado formular, pero hasta ahora ningún argumento de este tipo ha logrado una amplia aceptación. Parte del problema es que todavía no comprendemos plenamente la fusión de la mecánica cuántica y la gravedad, por lo que nuestros esquemas de cálculo son provisionales. Ante esta situación, algunos físicos, entre los que destaca Susskind, han sugerido que la constante cosmológica puede no ser realmente constante. Después de todo, si en un futuro lejano la constante cosmológica se disipa, la era de expansión acelerada terminaría y el horizonte cosmológico desaparecería. Con eso, Poincaré y sus recurrencias serían castrados. El jurado espera observaciones que, con optimismo, proporcionarán una visión de este futuro potencial.

35. Dado que la expansión inflacionaria comienza con una diminuta región del espacio que se hincha rápidamente bajo la fuerza de la gravedad repulsiva, se podría pensar que el reino resultante tendría necesariamente un tamaño finito. Después de todo, por mucho que estires algo finito, seguirá siendo finito. Pero la realidad es más intrincada. En la formulación estándar de la inflación, la mezcla de espacio y tiempo da como resultado que los observadores *dentro de* una región de inflación del espacio residen en una extensión que es *infinita*. Explico esto con cierto detalle en el capítulo 2 de *La realidad oculta,* al que remito al lector interesado para una explicación más completa. Obsérvese también que la cosmología inflacionaria puede dar lugar a un multiverso distinto pero relacionado: Una característica común de muchos escenarios inflacionarios es que la expansión inflacionaria no es un evento único. En

su lugar, distintos estallidos de expansión inflacionaria pueden dar lugar a muchos, generalmente infinitos, muchos universos en expansión, siendo nuestro universo sólo uno de la vasta colección. La colección de tales universos se conoce como el multiverso inflacionario y surge de lo que se conoce como la inflación eterna. Los aspectos de la descripción del multiverso que doy en este capítulo se aplican también al multiverso inflacionario. Para más detalles ver el capítulo 3 de *La Realidad Oculta.*

36.Para evitar interacciones en sus límites, se puede rodear cada una de esas regiones con un búfer lo suficientemente grande, asegurándose de que ninguna región haya tenido contacto con ninguna otra.

37.Jaume Garriga y Alexander Vilenkin, "Muchos mundos en uno", *Physical Review D* 64, no. 4 (2001): 043511. 38. Véase también J. Garriga, V. F. Mukhanov, K. D. Olum y A. Vilenkin, "Eternal Inflation, Black Holes, and the Future *of* Civilizations", *International Journal of Theoretical Physics* 39, Nº 7 (2000): 1887-1900, así como el libro de nivel general, Alex Vilenkin, *Many Worlds in One* (Nueva York: Hill y Wang, 2006).

Capítulo 11: La Nobleza del Ser

1.El papel de la evolución en la conformación de la ética fue discutido en E. O. Wilson, *Sociobiología: The New Synthesis* (Cambridge, MA: Harvard University Press, 1975), iniciando un nuevo paradigma para analizar el comportamiento humano en general y la moralidad humana en particular. Para una propuesta detallada que establece las etapas potenciales en la evolución de la moral humana, véase P. Kitcher, "Biology and Ethics", en *The Oxford Handbook of Ethical Theory* (Oxford: Oxford University Press, 2006), 163-85, y P. Kitcher, "Between Fragile Altruism and Morality": Evolution and the Emergence of Normative Guidance", *Evolutionary Ethics and Contemporary Biology* (2006): 159-77.

2.T. Nagel, *Mortal Questions* (Cambridge: Cambridge University Press, 1979), 142-46.

3.Ver, por ejemplo, J. Haidt, "The Emotional Dog and Its Rational Tail: A Social Intuitionist Approach to Moral Judgment", *Psychological Review* 108, no. 4 (2001): 814-34, y Jonathan Haidt, *The Righteous Mind: Why Good People Are Divided by Politics and Religion* (Nueva York: Pantheon Books, 2012).

4.Jorge Luis Borges, "El Inmortal", en *Laberintos: Historias selectas y otros escritos* (New York: New Directions Paperbook, 2017), 115. Otros libros a los que se hace referencia en este párrafo son Jonathan Swift, *Gulliver's Travels* (Nueva York: W. W. Norton, 1997); Karel Čapek, *The Makropulos Case,* en *Four Plays: R. U. R.; The Insect Play; The Makropulos Case; The White Plague* (Londres: Bloomsbury, 2014).

5.Bernard Williams, Problems *of the Self* (Cambridge: Cambridge University Press, 1973).

6.Aaron Smuts, "Inmortalidad y significado", *Filosofía y Literatura* 35, no. 1 (2011): 134-49.

7.Samuel Scheffler, *La muerte y la vida después de la muerte* (Nueva York: Oxford University Press, 2016), 59-60.

8.Como escribe Wolf, "Nuestra confianza en la continuación de la raza humana juega un enorme, aunque tácito, papel en la forma en que concebimos nuestras actividades y entendemos su valor". Samuel Scheffler, "The Significance of Doomsday," *Death and the Afterlife* (New York: Oxford University Press, 2016), 113.

9.Harry Frankfurt, "How the Afterlife Matters", en Samuel Scheffler, *Death and the Afterlife* (New York: Oxford University Press, 2016), 136.

10. Los adeptos a la visión de los muchos mundos de la mecánica cuántica pueden arrojar esta descripción bajo una luz diferente. Si todos los resultados posibles ocurren en un mundo u otro, este mundo fue predestinado. Pero el hecho de que las colecciones de autoconciencia estén entre los posibles resultados no es menos extraordinario.

Bibliografía

Aaronson, Scott. "Por qué no soy un teórico de la información integrada (o, el expansor inconsciente)". *Shtetl-Optimized.* https://www.scottaaronson.com/blog/?p=1799.

Abbot, P., J. Abe, J. Alcock, et al. "Teoría de la aptitud física inclusiva y eusocialidad". *Nature* 471 (2010): E1-E4.

Adams, Douglas. *La vida, el universo y todo lo demás.* Nueva York: Del Rey, 2005.

Adams, Fred C. y Gregory Laughlin. "Un universo moribundo: El destino a largo plazo y la evolución de los objetos astrofísicos". *Reviews of Modern Physics* 69 (1997): 337-72.

———. *Las Cinco Edades del Universo: Dentro de la Física de la Eternidad.* Nueva York: Free Press, 1999.

Albert, David. *Time and Chance.* Cambridge, MA: Harvard University Press, 2000.

Alberts, Bruce, et al. Molecular *Biology of the Cell,* 5th ed. Nueva York: Garland Science, 2007.

Albrecht, A. y L. Sorbo. "¿Puede el universo permitirse la inflación?" *Physical Review D* 70 (2004): 063528.

Albrecht, A. y P. Steinhardt. "Cosmología para grandes teorías unificadas con ruptura de simetría inducida por radiación". *Physical Review Letters* 48 (1982): 1220.

Andreassen, A., W. Frost y M. D. Schwartz. "Escala de Instantones Invariantes y la vida completa del Modelo Estándar". *Revisión Física D* 97 (2018): 056006.

Aoyama, Tatsumi, Masashi Hayakawa, Toichiro Kinoshita, y Makiko Nio. "Momento magnético anómalo del electrón de décimo orden: Contribución de los diagramas sin bucles leptónicos cerrados". *Revisión física D* 91 (2015): 033006.

Aquino, T. *Verdad*, volumen II. Traducido por James V. McGlynn, S.J. Chicago: Compañía Henry Regnery, 1953.

Ariès, Philippe. *La hora de nuestra muerte.* Traducido por Helen Weaver. Nueva York: Alfred A. Knopf, 1981.

Aristóteles, *Ética Nicomacheana.* Traducido por C. D. C. Reeve. Indianápolis, IN: Hackett Publishing, 2014.

Armstrong, Karen. *Una corta historia de mitos.* Melbourne: The Text Publishing Company, 2005.

Arnulf, Isabelle, Colette Buda y Jean-Pierre Sastre. "Michel Jouvet: Un explorador de sueños y un gran narrador de historias." Medicina *del sueño* 49 (2018): 4-9.

Atran, Scott. *En los dioses en los que confiamos: El paisaje evolutivo de la religión.* Oxford: Oxford University Press, 2002.

Augustine. *Confesiones. Traducido* por F. J. Sheed. Indianápolis, IN: Hackett Publishing, 2006.

Auton, A., L. Brooks, R. Durbin, et al. "Una referencia global para la variación genética humana". *Nature* 526, no. 7571 (octubre de 2015): 68-74.

Axelrod, Robert. *The Evolution of Cooperation, rev*. ed. Nueva York: Perseus Books Group, 2006.

Axelrod, Robert y William D. Hamilton. "La evolución de la cooperación". *Ciencia* 211 (marzo de 1981): 1390-96.

Baars, Bernard J. *En el Teatro de la Conciencia.* Nueva York: Oxford University Press, 1997.

Barrett, Justin L. *¿Por qué alguien creería en Dios?* Lanham, MD: AltaMira, 2004.

Barrow, John D. y Sigbjørn Hervik. "Procesamiento de información indefinida en universos en constante expansión". Letras de *Física B* 566, números 1-2 (24 de julio de 2003): 1-7.

Barrow, John D. y Frank J. Tipler. *El principio cosmológico antrópico.* Oxford: Oxford University Press, 1988.

Becker, Ernest. *La negación de la muerte.* Nueva York: Free Press, 1973.

Bekenstein, Jacob D. "Agujeros negros y entropía". *Revisión física D* 7 (15 de abril de 1973): 2333.

Brilla, Saúl. Conferencia Nobel, 12 de diciembre de 1976. En Conferencias Nóbel, *Literatura 1968-1980*, ed. Sture Allén. Singapur: World Scientific Publishing Co., 1993.

Bennett, Charles H. y Rolf Landauer. "Los límites físicos fundamentales de la computación". *Scientific American* 253, no. 1 (julio de 1985).

Bering, Jesse. *El Instinto de Creencia.* Nueva York: W. W. Norton, 2011.

Berwick, R. y N. Chomsky. *¿Por qué sólo nosotros?* Cambridge, MA: MIT Press, 2015.

Bierce, Ambrose. *El Diccionario del Diablo.* Mount Vernon, NY: The Peter Pauper Press, 1958.

Bigham, Abigail y otros: "Identificación de firmas de selección natural en las poblaciones tibetanas y andinas utilizando datos de escaneo de genoma denso". *PLoS Genetics* 6, no. 9 (9 de septiembre de 2010): e1001116.

Blackmore, Susan. *La Máquina de Meme.* Oxford: Oxford University Press, 1999.

Boddy, Kimberly K. y Sean M. Carroll. "¿Puede el bosón de Higgs salvarnos de la amenaza de los cerebros de Boltzmann?" 2013. arXiv:1308.468.

Boddy, K. K., S. M. Carroll y J. Pollack. "El espacio sin fluctuaciones cuánticas dinámicas". Foundations *of Physics* 46, no. 6 (2016): 702.

Boltzmann, Ludwig. "Sobre ciertas cuestiones de la teoría de los gases". *Nature* 51, nº 1322 (1895): 413-15.

———. *"Respuesta a las consideraciones de la teoría térmica del Sr. E. Zermelo". Anales de Física* 57 (1896): 773-84.

Borges, Jorge Luis. "El Inmortal". En *Laberintos: Historias selectas y otros escritos.* Nueva York: New Directions Paperbook, 2017.

Nacido, Max. *"Sobre la mecánica cuántica del impacto". Journal of Physics* 37, no. 12 (1926): 863-67.

Bousso, R. y B. Freivogel. "Una paradoja en la descripción global del multiverso". *Journal of High Energy Physics* 6 (2007): 018.

Boyd, Brian. "La evolución de las historias: de la mímesis al lenguaje, de la realidad a la ficción." *WIRES Cognitive Science* 9, no. 1 (2018), e1444-46.

———. "Teorías Evolutivas del Arte", en "*El Animal Literario": Evolución y la naturaleza de la narración.* Editado por Jonathan Gottschall y David Sloan Wilson. Evanston, IL: Northwestern University Press, 2005, 147.

———. *Sobre el origen de las historias.* Cambridge, MA: Belknap Press, 2010.

Boyer, Pascal. "Orígenes funcionales de los conceptos religiosos: Selección ontológica y estratégica en las mentes evolucionadas". Revista del Real *Instituto Antropológico* 6, no. 2 (junio de 2000): 195-214.

———. *La religión explicada: Los orígenes evolutivos del pensamiento religioso.* Nueva York: Basic Books, 2007.

Bruner, Jerome. *Haciendo historias: Derecho, Literatura, Vida.* Nueva York: Farrar, Straus y Giroux, 2002.

———. "La construcción narrativa de la realidad". *Critical Inquiry* 18, no. 1 (Otoño 1991): 1-21.

Buss, David. *Psicología evolutiva: La nueva ciencia de la mente.* Boston: Allyn y Bacon, 2012.

Cairns-Smith, A. G. *Siete pistas para el origen de la vida.* Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

Calaprice, Alice, ed. *El nuevo Einstein Citable.* Princeton, NJ: Princeton University Press, 2005.

Caldwell, Robert R., Marc Kamionkowski y Nevin N. Weinberg. "Energía Fantasma y el Día del Juicio Final Cósmico". *Physical Review Letters* 91 (2003): 071301.

Campbell, Joseph. *El Héroe de las Mil Caras.* Novato, CA: Biblioteca del Nuevo Mundo, 2008.

Camus, Albert. *Ensayos líricos y críticos.* Traducido por Ellen Conroy Kennedy. Nueva York: Vintage Books, 1970.

———. *El mito de Sísifo.* Traducido por Justin O'Brien. Londres: Hamish Hamilton, 1955.

Čapek, Karel. *El caso Makropulos.* En *cuatro jugadas: R. U. R.; El Juego de los Insectos; El Caso Makropulos; La Peste Blanca.* Londres: Bloomsbury, 2014.

Carlip, Steven. "Observadores transitorios y constantes variables, o repeliendo la invasión de los cerebros de Boltzmann". *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 06 (2007): 001.

Carnot, Sadi. *Reflexiones sobre el poder del fuego.* Mineola, NY: Dover Publications, Inc., 1960.

Carroll, Noël. "Las artes, la emoción y la evolución". En Estética *y Ciencias de la Mente*, ed. Greg Currie, Matthew Kieran, Aaron Meskin y Jon Robson. Oxford: Oxford University Press, 2014.

Carroll, Sean. *El panorama general: Sobre los orígenes de la vida, el significado y el propio universo*. Nueva York: Dutton, 2016.

Carter, B. "El agujero negro asimétrico tiene sólo dos grados de libertad". *Physical Review Letters* 26 (1971): 331.

Casals, Pablo. Festival de Bach: Prades 1950. Según la referencia de Paul Elie. *Reinventando Bach.* Nueva York: Farrar, Straus y Giroux, 2012.

Cavosie, A.J., J.W. Valley y S.A. Wilde. "El registro de minerales terrestres más antiguo: Treinta años de investigación sobre el Circón Hadeano de Jack Hills, Australia Occidental", en "*Las rocas más antiguas de la Tierra",* ed. M. J. Van Kranendonk. Nueva York: Elsevier, 2018, 255-78.

Ceresole, A., G. Dall'Agata, A. Giryavets, et al. "Muros de dominio, burbujas cercanas al BPS, y probabilidades en el paisaje". *Physical Review D* 74 (2006): 086010.

Chalmers, David J. "Enfrentando el problema de la conciencia". *Journal of Consciousness Studies* 2, no. 3 (1995): 200–19.

———. *La mente consciente: En busca de una teoría fundamental.* Oxford: Oxford University Press, 1997.

Chandrasekhar, Subrahmanyan. "La masa máxima de enanos blancos ideales". Revista de *Astrofísica* 74 (1931): 81-82.

Cheney, Dorothy L. y Robert M. Seyfarth. *Cómo los monos ven el mundo: Dentro de la mente de otra especie.* Chicago: University of Chicago Press, 1992.

Ćirković, Milan M. "Carta de Recursos": PEs-1: Escatología Física". *American Journal of Physics* 71 (2003): 122.

Cloak, F.T., Jr. "Microevolución cultural". *Research Previews* 13 (noviembre de 1966): 7-10.

Clottes, Jean. *¿Qué es el arte paleolítico? Pinturas rupestres y el amanecer de la creatividad humana.* Chicago: University of Chicago Press, 2016.

Coleman, Sidney. "El destino del falso vacío". Physical Review *D* 15 (1977): 2929; erratum, *Physical Review D* 16 (1977): 1248.

Conrad, Joseph. *El negro de "Narciso".* Mineola, NY: Dover Publications, Inc., 1999.

Coqueugniot, Hélène y otros: "Primer trauma craneoencefálico del Paleolítico Medio Levantino: Reevaluación 3D del cráneo de Qafzeh 11, consecuencias del daño cerebral pediátrico en la condición de vida del individuo y en la atención social". *PloS One* 9 (23 de julio de 2014): 7 e102822.

Crick, F.H.C., Leslie Barnett, S. Brenner y R.J. Watts-Tobin. "Naturaleza general del código genético de las proteínas", *Nature* 192 (dic. 1961): 1227-32.

Cronin, H. *La hormiga y el pavo real: El altruismo y la selección sexual desde Darwin hasta hoy.* Cambridge: Cambridge University Press, 1991.

Crooks, G. E. "Teorema de fluctuación de producción de entropía y la relación de trabajo de no equilibrio para las diferencias de energía libre". *Physical Review E* 60 (1999): 2721.

Damrosch, David. *El Libro Enterrado: La pérdida y el redescubrimiento de la gran epopeya de Gilgamesh.* Nueva York: Henry Holt y Compañía, 2007.

Darwin, Charles. *La descendencia del hombre y la selección en relación con el sexo.* Nueva York: D. Appleton y Compañía, 1871.

———. *La expresión de las emociones en el hombre y los animales.* Oxford: Oxford University Press, 1998.

———. Carta a Alfred Russel Wallace, 27 de marzo de 1869. https://www.darwinproject.ac.uk/letter/?docId=letters/DCP-LETT-6684.xml;query=child;brand=default.

———. *El origen de las especies.* Nueva York: Pocket Books, 2008.

Davies, Stephen. *La Especie Artística: Estética, Arte y Evolución.* Oxford: Oxford University Press, 2012.

Dawkins, Richard. *El engaño de Dios.* Nueva York: Houghton Mifflin Harcourt, 2006.

———. *El gen egoísta.* Oxford: Oxford University Press, 1976.

De Caro, M. y D. Macarthur. *El naturalismo en cuestión*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 2004.

Deamer, David. *Ensamblando la vida: ¿Cómo puede comenzar la vida en la Tierra y en otros planetas habitables?* Oxford: Oxford University Press, 2018.

Dehaene, Stanislas. *La conciencia y el cerebro.* Nueva York: Penguin Books, 2014.

Dehaene, Stanislas y Jean-Pierre Changeux. "Enfoques Experimentales y Teóricos del Procesamiento de la Conciencia". *Neurona* 70, no. 2 (2011): 200-227.

Dennett, Daniel. *Rompiendo el hechizo: La religión como un fenómeno natural.* Nueva York: Penguin Books, 2006.

———. *La conciencia explicada.* Boston: Little, Brown y Cía., 1991.

———. *Sala del Codo.* Cambridge, MA: MIT Press, 1984.

———. *La libertad evoluciona.* Nueva York: Penguin Books, 2003.

———. *La postura intencional.* Cambridge, MA: MIT Press, 1989.

Deutsch, David. *El comienzo del infinito: Explicaciones que transforman el mundo.* Nueva York: Vikingo, 2011.

Deutscher, Guy. *El desarrollo del lenguaje: Un recorrido evolutivo por el mayor invento de la humanidad.* Nueva York: Henry Holt y Compañía, 2005.

Dickinson, Emily. *Los poemas de Emily Dickinson*, lectura de ed., ed. R. W. Franklin. Cambridge, MA: The Belknap Press of Harvard University Press, 1999.

Dissanayake, Ellen. *Arte e Intimidad: Cómo empezaron las artes.* Seattle: University of Washington Press, 2000.

Distinto, Kate. *El Meme Egoísta: Una reevaluación crítica.* Cambridge: Cambridge University Press, 2005.

Doniger, Wendy, trans. *El Rig Veda.* Nueva York: Clásicos de pingüino, 2005.

Dor, Daniel. *La instrucción de la imaginación.* Oxford: Oxford University Press, 2015.

Dostoievski, Fyodor. *Crimen y castigo.* Traducido por Michael R. Katz. Nueva York: Liveright, 2017.

Dunbar, R.I.M. "Chismes en perspectiva evolutiva". *Review of General Psychology* 8, no. 2 (2004): 100-110.

———. *El aseo, el chisme y la evolución del lenguaje.* Cambridge, MA: Harvard University Press, 1997.

Dunbar, R.I.M., N.D.C. Duncan y A. Marriott. "Comportamiento de la conversación humana". *Human Nature* 8, no. 3 (1997): 231–46.

Dupré, John. "El milagro del monismo", en *Naturalism in Question,* ed. Mario de Caro y David Macarthur. Cambridge, MA: Harvard University Press, 2004.

Durant, Will. *La vida de Grecia.* Vol. 2 de *La Historia de la Civilización.* Nueva York: Simon & Schuster, 2011. Kindle, 8181-82.

Dutton, Denis. *El instinto del arte.* Nueva York: Bloomsbury Press, 2010.

Dyson, Freeman. "Tiempo sin fin: Física y biología en un universo abierto". *Reviews of Modern Physics* 51 (1979): 447-60.

Dyson, L., M. Kleban y L. Susskind. "Implicaciones perturbadoras de una constante cosmológica". *Journal of High Energy Physics* 0210 (2002): 011.

Eddington, A. "El fin del mundo: Desde el punto de vista de la Física Matemática." *Nature* 127, no. 3203 (1931): 447–53.

Einstein, Albert. *Notas autobiográficas.* La Salle, IL: Open Court Publishing, 1979.

Elgendi, Mohamed, y otros. "Subliminal Priming-State of the Art and Future Perspectives". *Ciencias del Comportamiento* (Basilea, Suiza) 8, no. 6 (30 de mayo de 2018): 54.

Ellenberger, Henri. *El descubrimiento del inconsciente.* Nueva York: Libros Básicos, 1970.

Si no, Jon, dir. *El Día Después de la Trinidad.* Houston: KETH, 1981.

Emerson, Ralph Waldo. *La conducta de la vida.* Boston y Nueva York: Compañía Houghton Mifflin, 1922.

Emler, N. "La verdad sobre los chismes". Boletín de la *Sección de Psicología Social* 27 (1992): 23-37.

Inglaterra, J. L. "Física estadística de la autorreplicación". *Journal of Chemical Physics* 139 (2013): 121923.

Epicuro. *El Epicuro esencial.* Traducido por Eugene O'Connor. Amherst, NY: Prometheus Books, 1993.

Falk, Dean. *Encontrando nuestras lenguas: Las madres, los bebés y los orígenes del lenguaje.* Nueva York: Basic Books, 2009.

———. "Evolución prelingüística en los primeros homínidos: ¿De dónde son las madres?" *Ciencias del Comportamiento y del Cerebro* 27 (2004): 491-541.

Fisher, R. A. *La teoría genética de la selección natural.* Oxford: Clarendon Press, 1930.

Fisher, Simon E., Faraneh Vargha-Khadem, Kate E. Watkins, Anthony P. Monaco, y Marcus E. Pembrey. "Localización de un gen implicado en un grave trastorno del habla y el lenguaje". *Nature Genetics* 18 (1998): 168-70.

Fowler, R. H. "Sobre la materia densa". Avisos Mensuales *de la Real Sociedad Astronómica* 87, no. 2 (1926): 114-22.

Freese, K. y W. Kinney. "El destino final de la vida en un universo en aceleración". Letras de *Física B* 558, números 1-2 (10 de abril de 2003): 1-8.

Friedmann, Alexander. Traducido por Brian Doyle. "Sobre la Curvatura del Espacio". *Zeitschrift für Physik* 10 (1922): 377-86.

Frijda, N., A. S. R. Manstead, y S. Bem. "La influencia de las emociones en la creencia", en *Emociones y creencias: How Feelings Influence Thoughts* (Studies in Emotion and Social Interaction), ed. N. Frijda, A. Manstead, y S. Bem. Cambridge: Cambridge University Press, 2000, 1-9.

Frijda, N. y B. Mesquita. "Creencias a través de las emociones", en *Emociones y Creencias: How Feelings Influence Thoughts* (Studies in Emotion and Social Interaction), ed. N. Frijda, A. Manstead, y S. Bem. Cambridge: Cambridge University Press, 2000, 45-77.

Fu, Wenqing, Timothy D. O'Connor, Goo Jun, y otros. "El análisis de 6.515 exomas revela el origen reciente de la mayoría de las variantes de codificación de proteínas humanas". *Nature* 493 (10 de enero de 2013): 216-20.

Garriga, Jaume y Alexander Vilenkin. "Muchos mundos en uno". *Revisión física D* 64, no. 4 (2001): 043511.

Garriga, J., V. F. Mukhanov, K. D. Olum y A. Vilenkin. "Inflación eterna, agujeros negros y el futuro de las civilizaciones". Revista *Internacional de Física Teórica* 39, no. 7 (2000): 1887-1900.

George, Andrew, trans. *La épica de Gilgamesh: El poema épico babilónico y otros textos en acadio y sumerio.* Londres: Penguin Classics, 2003.

Georgi, Howard y Sheldon Glashow. "Unidad de todas las fuerzas de las partículas elementales". Revisión de las Cartas *Físicas* 32, no. 8 (1974): 438.

Gottschall, Jonathan. *El Animal Narrador.* Boston y Nueva York: Mariner Books, Houghton Mifflin Harcourt, 2013.

Gould, Stephen J. *Conversaciones sobre el fin del tiempo.* Nueva York: Fromm International, 1999.

———. "La especia de la vida". Líder *a Líder* 15 (2000): 14-19.

———. *La riqueza de la vida: El esencial Stephen Jay Gould.* Nueva York: W. W. Norton, 2006.

Gould, S.J. y R.C. Lewontin. "Las enjutas de San Marco y el paradigma panglossiano": Una crítica del programa adaptacionista". Actas de *la Royal Society B,* 205, nº 1161 (21 de septiembre de 1979): 581-98.

Graziano, M. La conciencia *y el cerebro social.* Nueva York: Oxford University Press, 2013.

Greene, Brian. *El Universo Elegante.* Nueva York: Vintage, 2000.

———. *El tejido del cosmos.* Nueva York: Alfred A. Knopf, 2005.

———. *La realidad oculta.* Nueva York: Alfred A. Knopf, 2011.

Greene, Ellen. "Safo 58: Reflexiones filosóficas sobre la muerte y el envejecimiento". En *The New Sappho on Old Age: Textual and Philosophical Issues,* ed. Ellen Greene y Marilyn B. Skinner. Serie de Estudios Helénicos 38. Washington, DC: Centro de Estudios Helénicos, 2009. https://chs.harvard.edu/CHS/article/display/6036.11-ellen-greene-sappho-58-philosophical-reflections-on-death-and-aging#n.1.

Greene, Ellen, ed. *Leyendo a Sappho: Enfoques contemporáneos.* Berkeley: University of California Press, 1996.

Guenther, Mathias Georg. *Embaucadores y Tranceros: Religión y sociedad bosquimana*. Bloomington, IN: Indiana University Press, 1999.

Guth, Alan H. "Universo inflacionario: Una posible solución a los problemas del horizonte y la planicie". *Physical Review D* 23 (1981): 347.

———. *El Universo Inflacionario*. Nueva York: Basic Books, 1998.

Guthrie, Stewart. *Caras en las nubes: Una nueva teoría de la religión.* Nueva York: Oxford University Press, 1993.

Haidt, Jonathan. "El perro emocional y su cola racional: Un enfoque social intuicionista del juicio moral". *Psychological Review* 108, no. 4 (2001): 814–34.

———. *La Mente Justa: Por qué la gente buena está dividida por la política y la religión.* Nueva York: Pantheon Books, 2012.

Haldane, J. B. S. *Las causas de la evolución.* Londres: Longmans, Green & Co., 1932.

Halligan, Peter y John Marshall. "Visión ciega y perspicacia en la negligencia visuoespacial". *Nature* 336, no. 6201 (22-29 de diciembre de 1988): 766-67.

Hameroff, S. y R. Penrose. "La conciencia en el universo: Una revisión de la teoría 'Orch OR'." *Physics of Life Reviews* 11 (2014): 39-78.

Hamilton, W. D. "La evolución genética del comportamiento social". *Journal of Theoretical Biology* 7, no. 1 (1964): 1-16.

Harburg, Yip. "E. Y. Harburg, conferencia en la UCLA sobre escritura lírica, 3 de febrero de 1977." Transcripción, pp. 5-7, cinta 7-3-10.

———. "Yip en el YM-YWHA de la calle 92, 13 de diciembre de 1970." Transcripción #1-10-3, p. 3, cintas 7-2-10 y 7-2-20.

Hawking, S.W. "Creación de partículas por agujeros negros". *Communications in Mathematical Physics* 43 (1975): 199-220.

Hawking, Stephen y Leonard Mlodinow. *El Gran Diseño*. Nueva York: Bantam Books, 2010.

Hawks, John, Eric T. Wang, Gregory M. Cochran y otros. "Aceleración reciente de la evolución adaptativa humana". Actas *de la Academia Nacional de Ciencias* 104, no. 52 (diciembre de 2007): 20753-58.

Heisenberg, Werner. *Física y Filosofía: La revolución de la ciencia moderna.* Londres: Penguin Books, 1958.

Hirshfield, Jane. *Nueve puertas: Entrando en la mente de la poesía.* Nueva York: Harper Perennial, 1998.

Hogan, Patrick Colm. *La mente y sus historias.* Cambridge: Cambridge University Press, 2003.

Hrdy, Sarah. *Madres y otros: Los orígenes evolutivos del entendimiento mutuo*. Cambridge, MA: Belknap Press, 2009.

Hulse, R. A. y J. H. Taylor. "Descubrimiento de un púlsar en un sistema binario". Revista de *Astrofísica* 195 (1975): L51.

Ijjas, Anna y Paul Steinhardt. "Un nuevo tipo de universo cíclico" (2019). arXiv:1904.0822[gr-qc].

Islam, Jamal N. "Posible destino final del universo". Revista trimestral *de la Real Sociedad Astronómica* 18 (marzo de 1977): 3-8.

Israel, W. "Horizontes de sucesos en el espacio y el tiempo estático electrovacífico". *Comunicaciones en Física Matemática* 8 (1968): 245.

———. "Horizontes de eventos en el espacio y tiempo de vacío estático". *Revisión física* 164 (1967): 1776.

Jackson, Frank. "Qualia Epifenomenal". *Philosophical Quarterly* 32 (1982): 127-36.

———. "Posdata sobre Qualia". En *Mente, Método y Condicionales: Ensayos seleccionados.* Londres: Routledge, 1998, 76-79.

James, William. *Las variedades de la experiencia religiosa: Un estudio de la naturaleza humana.* Nueva York: Longmans, Green, and Co., 1905.

Jarzynski, C. "Igualdad de no equilibrio para las diferencias de energía libre". *Physical Review Letters* 78 (1997): 2690-93.

Jaspers, Karl. *El origen y la meta de la historia.* Abingdon, Reino Unido: Routledge, 2010.

Jeong, Choongwon, y Anna Di Rienzo. "Adaptaciones a los entornos locales en las poblaciones humanas modernas". Opinión *actual en Genética y Desarrollo 29* (2014): 1-8.

Jones, Barbara E. "Los misterios del sueño y la vigilia revelados por Michel Jouvet". Medicina *del sueño* 49 (2018): 14-19.

Joordens, Josephine C. A., y otros. "*Homo erectus* en Trinil en Java usaba conchas para la producción de herramientas y el grabado". *Nature* 518 (12 de febrero de 2015): 228-31.

Jørgensen, Timmi G., y Ross P. Church. "Los escapes estelares de M67 pueden alcanzar órbitas galácticas similares a la solar". arxiv.org: arXiv:1905.09586.

Joyce, G.F. y J.W. Szostak. "Protocélulas y autorreplicación de ARN". Cold Spring Harbor Perspectives *in Biology* 10, no. 9 (2018).

Jung, Carl. "El alma y la muerte". En *Obras Completas de C. G. Jung,* ed. Gerald Adler y R. F. C. Hull. Princeton: Princeton University Press, 1983.

Kachman, Tal, Jeremy A. Owen y Jeremy L. England. "Resonancia autoorganizada durante la búsqueda de un espacio químico diverso". Cartas de *Revisión Física* 119, no. 3 (2017): 038001–1.

Kafka, Franz. *Los Cuadernos Octavo Azul. Traducido* por Ernst Kaiser y Eithne Wilkens, editado por Max Brod. Cambridge, MA: Cambio exacto, 1991.

Keller, Helen. Carta a la Orquesta Sinfónica de Nueva York, 2 de febrero de 1924. Archivos digitales de la Fundación Americana para los Ciegos, nombre de archivo HK01-07_B114_F08_015_002.tif.

Kennedy, J. Gerald. *Poe, la muerte y la vida de la escritura.* New Haven: Yale University Press, 1987.

Kierkegaard, Søren. *El concepto de temor. Traducido* y con introducción y notas de Walter Lowrie. Princeton: Princeton University Press, 1957.

Kitcher, P. "Entre el frágil altruismo y la moralidad: Evolución y la aparición de la orientación normativa". *Ética evolutiva y biología contemporánea* (2006): 159-77.

———. "Biología y Ética". En *el Manual de Oxford de Teoría Ética.* Oxford: Oxford University Press, 2006.

Klinkhamer, F.R. y N.S. Manton. "Una solución de punto de asiento en la teoría de Weinberg-Salam". *Physical Review D* 30 (1984): 2212.

Koch, Christof. *Conciencia: Confesiones de un reduccionista romántico.* Cambridge, MA: MIT Press, 2012.

Kragh, Helge. "Nombrando el Big Bang". *Estudios Históricos en las Ciencias Naturales* 44, no. 1 (Febrero 2014): 3-36.

Krause, Johannes, Carles Lalueza-Fox, Ludovic Orlando, etc. "La variante derivada de FOXP2 de los humanos modernos fue compartida con los neandertales". *Current Biology* 17 (2007): 1908-12.

Krauss, Lawrence M. y Glenn D. Starkman. "La vida, el universo y la nada: La vida y la muerte en un universo en constante expansión". Revista de *Astrofísica* 531 (2000): 22-30.

Krutch, Joseph Wood. "Arte, Magia y Eternidad". Revista trimestral de *Virginia* 8, no. 4 (Otoño de 1932).

Lai, C. S. L., y otros. "Un nuevo gen del dominio de la cabeza de horquilla ha mutado en un grave trastorno del habla y el lenguaje". *Nature* 413 (2001): 519-23.

Landon, H. C. Robbins. *Beethoven: Un estudio documental.* Nueva York: Macmillan Publishing Co., Inc., 1970.

Laurent, John. "Una nota sobre el origen de los 'Memes'/'Mnemes'. " *Journal of Memetics* 3 (1999): 14-19.

Lemaître, Georges. *"Encuentros con Einstein". Revista Científica* 129 (1958): 129-32.

Leonard, Scott y Michael McClure. *Mito y conocimiento.* Nueva York: McGraw-Hill Higher Education, 2004.

Lewis, David. Papeles *en Metafísica y Epistemología, vol.* 2. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.

———. "Lo que la experiencia enseña. "Actas de *la Sociedad Rusa* 13 (1988): 29-57.

Lewis, S. M. y C. K. Cratsley. "Evolución de la señal del flash, elección de pareja y depredación en las luciérnagas". Annual *Review of Entomology* 53 (2008): 293-321.

Lewis-Williams, David. *La Mente en la Cueva: La conciencia y los orígenes del arte.* Nueva York: Thames & Hudson, 2002.

Linde, A. "Un nuevo escenario del universo inflacionario: Una posible solución a los problemas de horizonte, planicie, homogeneidad, isotropía y monopolio primordial". Letras de *Física B* 108 (1982): 389.

———. "Se hunde en el paisaje, los cerebros de Boltzmann, y el problema de la constante cosmológica." *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 0701 (2007): 022.

Loeb, Abraham. "Cosmología con estrellas de hipervelocidad". Revista *de Cosmología y Física de Astropartículas* 04 (2011): 023.

Loewi, Otto. "Un bosquejo autobiográfico". Perspectivas *en Biología y Medicina* 4, no. 1 (Otoño 1960): 3-25. Louie,

Kenway y Matthew A. Wilson. "Repetición temporalmente estructurada de la actividad del Conjunto Hipocampal Despierto durante el sueño de movimiento ocular rápido". *Neuron* 29 (2001): 145-56.

Mackay, Alan Lindsay. *La cosecha de un ojo tranquilo: Una selección de citas científicas.* Bristol: Instituto de Física, 1977.

Maddox, Brenda. *Rosalind Franklin: La Dama Oscura del ADN.* Nueva York: Harper Perennial, 2003.

Marcel, Anthony J. "Percepción consciente e inconsciente: Experimentos de enmascaramiento visual y reconocimiento de palabras". *Psicología Cognitiva* 15 (1983): 197-237.

Martin, W. y M. J. Russell. "Sobre el origen de la bioquímica en un respiradero hidrotérmico alcalino". *Transacciones filosóficas de la Real Sociedad B* 367 (2007): 1887-925.

Matthaei, J. Heinrich, Oliver W. Jones, Robert G. Martin y Marshall W. Nirenberg. "Características y composición de las unidades de codificación del ARN". Actas *de la Academia Nacional de Ciencias* 48, no. 4 (1962): 666–77.

Melville, Herman. *Moby-Dick.* Hertfordshire, Reino Unido: Wordsworth Classics, 1993.

Méndez, Fernando L., y otros. "La Divergencia de los Cromosomas Y Humanos Neandertales y Modernos". *American Journal of Human Genetics* 98, no. 4 (2016): 728–34.

Miller, Geoffrey. *La Mente de Apareamiento: Cómo la elección sexual dio forma a la evolución de la naturaleza humana.* Nueva York: Anchor, 2000.

Mitchell, P. "Acoplamiento de la fosforilación a la transferencia de electrones e hidrógeno por un mecanismo de tipo quimiosmótico". *Nature* 191 (1961): 144-48.

Morrison, Toni. Conferencia del Premio Nobel, 7 de diciembre de 1993. https://www.nobelprize.org/prizes/literature/1993/morrison/lecture/.

Müller, Max, trans. *Los Upanishads.* Oxford: The Clarendon Press, 1879.

Nabokov, Vladimir. *Habla, Memoria: Una autobiografía revisada.* Nueva York: Alfred A. Knopf, 1999.

Naccache, L. y S. Dehaene. "El método de cebado": Imaginando la repetición inconsciente, la preparación revela una representación abstracta del número en los lóbulos parietales". *Corteza cerebral* 11, no. 10 (2001): 966-74.

———. "La preparación semántica inconsciente se extiende a los nuevos estímulos no vistos". *Cognición* 80, no. 3 (2001): 215–29.

Nagel, Thomas. *Preguntas mortales.* Cambridge: Cambridge University Press, 1979.

———. "¿Cómo es ser un murciélago?" Revista *filosófica* 83, no. 4 (1974): 435–50.

Nelson, Philip. *Física Biológica: Energía, Información, Vida*. Nueva York: W. H. Freeman y Cía., 2014.

Nemirow, Laurence. "El fisicalismo y el papel cognitivo de los conocidos". En *Mind and Cognition,* ed. W. Lycan. Oxford: Blackwell, 1990, 490-99.

———. "Revisión de las cuestiones mortales de Nagel". Revista *filosófica* 89 (1980): 473-77.

Newton, Isaac. Carta a Henry Oldenburg, 6 de febrero de 1671. http://www.newtonproject.ox.ac.uk/view/texts/normalized/NATP00003.

Nietzsche, Friedrich. *El Crepúsculo de los Ídolos.* Traducido por Duncan Large. Oxford: Oxford University Press, 1998.

Norenzayan, A., e I. G. Hansen. "Creencia en agentes sobrenaturales ante la muerte". Boletín de Personalidad *y Psicología Social* 32 (2006): 174-87.

Nowak, M. A., C. E. Tarnita y E. O. Wilson. "La evolución de la eusocialidad". *Nature* 466, nº 7310 (2010): 1057-62.

Nozick, Robert. *Explicaciones filosóficas.* Cambridge, MA: Belknap Press, 1983.

———. "La filosofía y el sentido de la vida". En la *vida, la muerte y el significado: Key Philosophical Readings on the Big Questions,* ed. David Benatar. Lanham, MD: The Rowman & Littlefield Publishing Group, 2010, 65-92.

Nussbaumer, Harry. "La conversión de Einstein de su universo estático a uno en expansión". Revista de *Física Europea-Historia* 39 (2014): 37-62.

Oates, Joyce Carol. "La literatura como placer, el placer como literatura". *Narrativa.* https://www.narrativemagazine.com/issues/stories-week-2015-2016/story-week/literature-pleasure-pleasure- literature-joyce-carol-oates.

Oatley, K. "Por qué la ficción puede ser dos veces más verdadera que los hechos". *Revisión de Psicología General* 3 (1999): 101-17.

Oizumi, Masafumi, Larissa Albantakis y Giulio Tononi. "De la fenomenología a los mecanismos de la conciencia: Teoría de la Información Integrada 3.0." *PLoS Biología Computacional* 10, no. 5 (Mayo 2014).

Page, Don N. "¿Nuestro universo está decayendo a un ritmo astronómico?" Letras de *Física B* 669 (2008): 197-200.

———. "La vida del universo". Revista de *la Sociedad de Física de Corea* 49 (2006): 711-14.

———. "Tasas de emisión de partículas de un agujero negro: Partículas sin masa de un agujero sin carga y sin rotación." *Physical Review D* 13, no. 2 (1976): 198-206.

Page, Tim, ed. *El lector de Glenn Gould*. Nueva York: Vintage, 1984.

Parker, Eric, Henderson J. Cleaves, Jason P. Dworkin, et al. "Síntesis primitiva de aminas y aminoácidos en un experimento de descarga de chispas rico en H2S de Miller de 1958". Actas *de la Academia Nacional de Ciencias* 108, no. 14 (Abril 2011): 5526-31.

Perlmutter, Saul, y otros. "Mediciones de Ω y Λ de 42 Supernovas de alto desplazamiento". Revista de *Astrofísica* 517, no. 2 (1999): 565.

Perunov, Nikolay, Robert A. Marsland y Jeremy L. England. "Física Estadística de la Adaptación". *Revisión Física X* (Junio 2016): 021036-1.

Pichardo, Bárbara, Edmundo Moreno, Christine Allen, etc. "El Sol no nació en M67". *The Astronomical Journal* 143, no. 3 (2012): 73–84.

Pinker, Steven. *Cómo funciona la mente.* Nueva York: W. W. Norton, 1997.

———. "El lenguaje como una adaptación al nicho cognitivo". En "Language *Evolution": States of the Art*, ed. S. Kirby y M. Christiansen. Nueva York: Oxford University Press, 2003.

———. *El instinto del lenguaje*. Nueva York: W. Morrow y Cía., 1994.

Pinker, S. y P. Bloom. "Lenguaje natural y selección natural". *Ciencias del Comportamiento y del Cerebro* 13, no. 4 (1990): 707–84.

Plath, Sylvia. *La colección de poemas.* Editado por Ted Hughes. Nueva York: Harper Perennial, 1992.

Prebble, John y Bruce Weber. *Vagando por los Jardines de la Mente: Peter Mitchell y la fabricación de Glynn.* Oxford: Oxford University Press, 2003.

Premack, David y Guy Woodruff. "¿Tiene el chimpancé una teoría de la mente?" *Cognición y Conciencia en especies no humanas,* número especial de *Ciencias del Comportamiento y del Cerebro* 1, no. 4 (1978): 515–26.

Proust, Marcel. *Recuerdo de las cosas pasadas.* Vol. 3: *El cautivo, el fugitivo, el tiempo recuperado.* Nueva York: Vintage, 1982.

Prum, Richard. *La evolución de la belleza: Cómo la teoría olvidada de Darwin sobre la elección de pareja da forma al mundo animal y a nosotros.* Nueva York: Doble jornada, 2017.

Pyszczynski, Tom, Sheldon Solomon y Jeff Greenberg. "Treinta años de teoría del manejo del terror". *Avances en la Psicología Social Experimental* 52 (2015): 1-70.

Rango, Otto. *Arte y Artista: Impulso creativo y desarrollo de la personalidad.* Traducido por Charles Francis Atkinson.
Nueva York: Alfred A. Knopf, 1932.

———. *La psicología y el alma.* Traducido por William D. Turner. Filadelfia: University of Pennsylvania Press, 1950.

Rees, M. J. "El colapso del universo: Un estudio escatológico". *Observatorio* 89 (1969): 193-98. Reinach,
Salomon. Sectas, *mitos y religiones.* Traducido por Elizabeth Frost. Londres: David Nutt, 1912.

Revonsuo, Antti, Jarno Tuominen, y Katja Valli. "Los Avatares en la Máquina Soñando como una Simulación de la Realidad Social". *Open MIND* (2015): 1-28.

Rodd, F. Helen, Kimberly A. Hughes, Gregory F. Grether y Colette T. Baril. "Un posible origen no sexual de la preferencia de pareja: ¿Los guppys machos están imitando la fruta?" *Actas de la Royal Society B* 269 (2002): 475-81.

Roney, James R. "Agradable pero improbable, una revisión de la mente de apareamiento por Geoffrey Miller". *Psycoloquy* 13, no. 10 (2002): artículo 5.

Rosenblatt, Abram, Jeff Greenberg, Sheldon Solomon, et al. "Evidencia para la Teoría de Manejo del Terror I: Los efectos de la Saliencia de la Mortalidad en las reacciones a aquellos que violan o mantienen los valores culturales". *Journal of Personality and Social Psychology* 57 (1989): 681-90.

Rowland, Peter. *Bowerbirds.* Collingwood, Australia: CSIRO Publishing, 2008.

Russell, Bertrand. *Por qué no soy cristiano.* Nueva York: Simon y Schuster, 1957.

———. *Conocimiento humano*. Nueva York: Routledge, 2009.

Ryan, Michael. *Un gusto por lo bello.* Princeton: Princeton University Press, 2018.

Sackmann I.-J., A.I. Boothroyd y K.E. Kraemer. "Nuestro Sol". III. Presente y futuro". *Revista de Astrofísica* 418 (1993): 457.

Sartre, Jean-Paul. *El muro y otras historias*. Traducido por Lloyd Alexander. Nueva York: New Directions Publishing, 1975.

Scarpelli, Serena, Chiara Bartolacci, Aurora D'Atri, y otros. "El papel funcional del sueño en los procesos emocionales". *Fronteras de la Psicología* 10 (Mar. 2019): 459.

Scheffler, Samuel. *La muerte y la vida después de la muerte.* Nueva York: Oxford University Press, 2016.

Schmidt, B. P., y otros. "La búsqueda de la supernova High-Z": Medición de la desaceleración cósmica y la curvatura global del universo usando supernovas de tipo IA". *Revista de Astrofísica* 507 (1998): 46.

Schrödinger, Erwin. *¿Qué es la vida?* Cambridge: Cambridge University Press, 2012.

Schroder, Klaus-Peter y Robert C. Smith, "Futuro distante del Sol y la Tierra revisitados". *Avisos mensuales de la Real Sociedad Astronómica* 386, no. 1 (2008): 155-63.

Schvaneveldt, R. W., D. E. Meyer, y C. A. Becker. "Ambigüedad léxica, contexto semántico y reconocimiento visual de palabras". *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 2, no. 2 (1976): 243-56.

Schwartz, Joel S. "Darwin, Wallace y el *descenso del hombre. "Revista de Historia de la Biología* 17, no. 2 (1984): 271-89.

Shakespeare, William. *Medida por medida.* Editado por J. M. Nosworthy. Londres: Penguin Books, 1995.

Shaw, George Bernard. *De vuelta a Matusalén.* Scotts Valley, CA: CreateSpace Independent Publishing Platform, 2012.

Sheff, David. "Keith Haring, una conversación íntima". *Rolling Stone* 589 (agosto de 1989): 47.

Shermer, Michael. *El cerebro creyente: De los fantasmas y los dioses a la política y las conspiraciones*. Nueva York: St.
Martin's Griffin, 2011.

Silver, David, Thomas Hubert, Julian Schrittwieser y otros. "Un algoritmo de aprendizaje de refuerzo general que domina el ajedrez, el shogi y el juego personal". *Ciencia* 362 (2018): 1140-44.

Smuts, Aaron. "Inmortalidad y significado". *Filosofía y Literatura* 35, no. 1 (2011): 134-49.

Solomon, Sheldon, Jeff Greenberg y Tom Pyszczynski. "Cuentos de la Cripta": Sobre el papel de la muerte en la vida".
Zygon 33, no. 1 (1998): 9-43.

———. *El Gusano en el Núcleo: Sobre el papel de la muerte en la vida.* Nueva York: Random House Publishing Group, 2015.

Sosis, R. "Religión y cooperación intragrupo: Resultados preliminares de un análisis comparativo de comunidades utópicas". *Cross-Cultural Research* 34 (2000): 70-87.

Sosis, R. y C. Alcorta. "Señalización, solidaridad y lo sagrado: La evolución del comportamiento religioso". *Antropología Evolutiva* 12 (2003): 264-74.

Spengler, Oswald. *La decadencia de Occidente.* Nueva York: Alfred A. Knopf, 1986.

Sperber, Dan. *Explicando la cultura: Un enfoque naturalista.* Oxford: Blackwell Publishers Ltd., 1996.

———. *Repensando el simbolismo.* Cambridge: Cambridge University Press, 1975.

Stapledon, Olaf. *Star Maker.* Mineola, NY: Dover Publications, 2008.

Steinhardt, Paul J., y Neil Turok. "El modelo cíclico simplificado". *New Astronomy Reviews* 49 (2005): 43-57.

Sterelny, Kim. *El aprendiz evolucionado: Cómo la evolución hizo a los humanos únicos*. Cambridge, MA: MIT Press, 2012.

Stroud, Barry. "El encanto del naturalismo", *Actas y discursos de la Asociación Filosófica Americana* 70, no. 2 (noviembre de 1996).

Stulp, G., L. Barrett, F. C. Tropf y M. Mills. "¿La selección natural favorece una mayor estatura entre las personas más altas de la tierra?" *Actas de la Sociedad Real B* 282: 20150211.

Susskind, Leonard. *La Guerra del Agujero Negro: Mi batalla con Stephen Hawking para hacer del mundo un lugar seguro para la mecánica cuántica.* Nueva York: Little, Brown and Co., 2008.

Rápido, Jonathan. Los viajes de *Gulliver.* Nueva York: W. W. Norton, 1997.

Szent-Györgyi, Albert. "Biología y patología del agua". *Perspectivas en Biología y Medicina* 14, no. 2 (1971): 239-49.

Hooft, G. "Cálculo de los efectos cuánticos debidos a una pseudopartícula cuatridimensional". *Physical Review D* 14 (1976): 3432.

Thoreau, Henry David. *El Diario 1837-1861.* Nueva York: New York Review Books Classics, 2009.

Hora 41, nº 14 (5 de abril de 1943): 42.

Tolman, Richard C. "Sobre el problema de la entropía del universo en su conjunto". *Physical Review* 37 (1931): 1639- 60.

———. "Sobre los requisitos teóricos para un comportamiento periódico del universo." *Physical Review* 38 (1931): 1758-71.

Tomasello, Michael. "La gramática universal está muerta". *Ciencias del Comportamiento y del Cerebro* 32, no. 5 (Octubre 2009): 470- 71.

Tononi, Giulio. *Phi: Un viaje del cerebro al alma.* Nueva York: Panteón, 2012.

Tooby, John y Leda Cosmides. "¿La belleza construye mentes adaptadas? Hacia una teoría evolutiva de la estética, la ficción y las artes". *Subtítulo* 30, no. 1/2, número 94/95 (2001): 6-27.

———. "Los fundamentos psicológicos de la cultura". En *La Mente Adaptada: Psicología Evolutiva y la Generación de la Cultura*, ed. Jerome H. Barkow, Leda Cosmides, y John Tooby. Oxford: Oxford University Press, 1992, 19-136.

Tremlin, Todd. *Mentes y dioses: Los fundamentos cognitivos de la religión.* Oxford: Oxford University Press, 2006.

Trinkaus, Erik, Alexandra Buzhilova, Maria Mednikova y Maria Dobrovolskaya. *El pueblo de Sunghir: Entierros, cuerpos y comportamiento en el Paleolítico Superior anterior.* Nueva York: Oxford University Press, 2014.

Trivers, Robert. "Inversión parental y selección sexual". En *Selección sexual y la descendencia del hombre: The Darwinian Pivot*, ed. Bernard G. Campbell. Chicago: Aldine Publishing Company, 1972.

Tylor, Edward Burnett. *Cultura primitiva, vol.* 2. Londres: John Murray, 1873; Dover Reprint Edition, 2016, 24.

Ucko, Peter J., y Andrée Rosenfeld. Arte *rupestre paleolítico.* Nueva York: McGraw-Hill, 1967, 117-23, 165-74.

Valley, John W., William H. Peck, Elizabeth M. King y Simon A. Wilde. "Una fría Tierra temprana". *Geología* 30 (2002): 351–54.

Vilenkin, A. "Predicciones de la cosmología cuántica". *Physical Review Letters* 74 (1995): 846.

Vilenkin, Alex. *Muchos mundos en uno.* Nueva York: Hill y Wang, 2006.

Wagoner, R. V. "Prueba de la existencia de radiación gravitacional". *Revista de Astrofísica* 196 (1975): L63.

Wallace, Alfred Russel. *Selección natural y naturaleza tropical.* Londres: Macmillan y Cía., 1891.

———. "Sir Charles Lyell sobre los climas geológicos y el origen de las especies." *Revista trimestral* 126 (1869): 359- 94.

Watson, J.D. y F.H.C. Crick. "Estructura molecular de los ácidos nucleicos: Una estructura para el ácido nucleico desoxirriboso". *Nature* 171 (1953): 737-38

Webb, Taylor y M. Graziano. "La teoría del esquema de atención: Un relato mecanicista de la conciencia subjetiva". *Fronteras de la Psicología* 6 (2015): 500.

Wertheimer, Max. *Productive Thinking*, ed. ampliada. Nueva York: Harper and Brothers, 1959.

Wheeler, John Archibald y Wojciech Zurek. *Teoría Cuántica y Medición.* Princeton: Princeton University Press, 1983.

Whitehead, Alfred North. *La ciencia y el mundo moderno.* Nueva York: The Free Press, 1953.

Wigner, Eugene. *Simetrías y Reflexiones.* Cambridge, MA: MIT Press, 1970.

Wilkins, Maurice. *El Tercer Hombre de la Doble Hélice.* Oxford: Oxford University Press, 2003.

Williams, Bernard. *Los problemas del yo.* Cambridge: Cambridge University Press, 1973.

Williams, Tennessee. *Gato en un tejado de hojalata caliente.* Nueva York: Nueva Biblioteca Americana, 1955.

Wilson, David Sloan. *La catedral de Darwin: Evolución, religión y la naturaleza de la sociedad.* Chicago: University of Chicago Press, 2002.

———. *¿Existe el altruismo? La cultura, los genes y el bienestar de los demás.* New Haven: Yale University Press, 2015. Wilson, E. O. *Sociobiología: La nueva síntesis.* Cambridge, MA: Harvard University Press, 1975.

Wilson, K. G. "Fenómenos críticos en 3.99 dimensiones". *Physica* 73 (1974): 119.

Wittgenstein, Ludwig. *Tractatus Logico-Philosophicus.* Nueva York: Harcourt, Brace & Company, 1922.

Witzel, Michael. *Los orígenes de las mitologías del mundo.* Nueva York: Oxford University Press, 2012.

Woosley, S. E., A. Heger y T. A. Weaver. "La evolución y explosión de las estrellas masivas". *Reviews of Modern Physics* 74 (2002): 1015-71.

Wrangha, Richard. *Atrapando el fuego: Cómo la cocina nos hizo humanos*. Nueva York: Basic Books, 2009.

Yeats, W. B. *Coleccionaba poemas.* Nueva York: Libros de la biblioteca del coleccionista Macmillan, 2016. Yourcenar, Marguerite. Cuentos *orientales.* Nueva York: Farrar, Straus y Giroux, 1985.

Zahavi, Amotz. "Selección de pareja: una selección para un discapacitado". *Revista de Biología Teórica* 53, no. 1 (1975): 205- 14.

Zuckerman, M. "Buscando la sensación: Un enfoque comparativo de un rasgo humano". *Ciencias del Comportamiento y del Cerebro* 7 (1984): 413-71.

Zunshine, Lisa. *Por qué leemos ficción: Teoría de la Mente y la Novela.* Colón: Ohio State University Press, 2006.

UNA NOTA SOBRE EL AUTOR

Brian Greene es profesor de física y matemáticas en la Universidad de Columbia y es conocido por una serie de descubrimientos innovadores en la teoría de las cuerdas. Es el autor de los libros más vendidos del *New York Times, El Universo Elegante, La Tela del Cosmos* y *La Realidad Oculta.* Greene fue el anfitrión de dos miniseries premiadas de *NOVA* basadas en sus libros y es también cofundador del Festival Mundial de la Ciencia. Con su esposa e hijos, vive en los Andes, Nueva York y en la ciudad de Nueva York.